

Doc 9817
AN/449



Manual sobre cizalladura del viento a poca altura

Aprobado por el Secretario General
y publicado bajo su responsabilidad

Primera edición — 2005

Organización de Aviación Civil Internacional

Publicado por separado en español, francés, inglés y ruso, por la Organización de Aviación Civil Internacional. Toda la correspondencia, con excepción de los pedidos y suscripciones, debe dirigirse al Secretario General.

Los pedidos deben dirigirse a las direcciones siguientes junto con la correspondiente remesa (mediante giro bancario, cheque u orden de pago) en dólares estadounidenses o en la moneda del país de compra. En la Sede de la OACI también se aceptan pedidos pagaderos con tarjetas de crédito (American Express, MasterCard o Visa).

International Civil Aviation Organization. Attention: Document Sales Unit, 999 University Street, Montréal, Quebec, Canada H3C 5H7
Teléfono: +1 (514) 954-8022; Facsímile: +1 (514) 954-6769; Sitatex: YULCAYA; Correo-e: sales@icao.int; World Wide Web: <http://www.icao.int>

Alemania. UNO-Verlag GmbH, August-Bebel-Allee 6, 53175 Bonn
Teléfono: +49 (0) 228-94 90 2-0; Facsímile: +49 (0) 228-94 90 2-22; Correo-e: info@uno-verlag.de; World Wide Web: <http://www.uno-verlag.de>

Camerún. KnowHow, 1, Rue de la Chambre de Commerce-Bonanjo, B.P. 4676, Douala / Teléfono: +237 343 98 42; Facsímile: + 237 343 89 25;
Correo-e: knowhow_doc@yahoo.fr

China. Glory Master International Limited, Room 434B, Hongshen Trade Centre, 428 Dong Fang Road, Pudong, Shanghai 200120
Teléfono: +86 137 0177 4638; Facsímile: +86 21 5888 1629; Correo-e: glorymaster@online.sh.cn

Egipto. ICAO Regional Director, Middle East Office, Egyptian Civil Aviation Complex, Cairo Airport Road, Heliopolis, Cairo 11776
Teléfono: +20 (2) 267 4840; Facsímile: +20 (2) 267 4843; Sitatex: CAICAYA; Correo-e: icaomid@cairo.icao.int

Eslovaquia. Air Traffic Services of the Slovak Republic, Letové prevádzkové služby Slovenskej Republiky, State Enterprise, Letisko M.R. Štefánika, 823 07 Bratislava 21 / Teléfono: +421 (7) 4857 1111; Facsímile: +421 (7) 4857 2105

España. A.E.N.A. — Aeropuertos Españoles y Navegación Aérea, Calle Juan Ignacio Luca de Tena, 14, Planta Tercera, Despacho 3. 11, 28027 Madrid / Teléfono: +34 (91) 321-3148; Facsímile: +34 (91) 321-3157; Correo-e: ssc.ventasoci@aena.es

Federación de Rusia. Aviaizdat, 48, Ivan Franko Street, Moscow 121351 / Teléfono: +7 (095) 417-0405; Facsímile: +7 (095) 417-0254

India. Oxford Book and Stationery Co., Scindia House, New Delhi 110001 o 17 Park Street, Calcutta 700016
Teléfono: +91 (11) 331-5896; Facsímile: +91 (11) 51514284

India. Sterling Book House — SBH, 181, Dr. D. N. Road, Fort, Bombay 400001
Teléfono: +91 (22) 2261 2521, 2265 9599; Facsímile: +91 (22) 2262 3551; Correo-e: sbh@vsnl.com

Japón. Japan Civil Aviation Promotion Foundation, 15-12, 1-chome, Toranomon, Minato-Ku, Tokyo
Teléfono: +81 (3) 3503-2686; Facsímile: +81 (3) 3503-2689

Kenya. ICAO Regional Director, Eastern and Southern African Office, United Nations Accommodation, P.O. Box 46294, Nairobi
Teléfono: +254 (20) 7622 395; Facsímile: +254 (20) 7623 028; Sitatex: NBOCAYA; Correo-e: icao@icao.unon.org

México. Director Regional de la OACI, Oficina Norteamérica, Centroamérica y Caribe, Av. Presidente Masaryk No. 29, 3er. Piso, Col. Chapultepec Morales, C.P. 11570, México, D.F.
Teléfono: +52 (55) 52 50 32 11; Facsímile: +52 (55) 52 03 27 57; Correo-e: icao_nacc@mexico.icao.int

Nigeria. Landover Company, P.O. Box 3165, Ikeja, Lagos
Teléfono: +234 (1) 4979780; Facsímile: +234 (1) 4979788; Sitatex: LOSLORK; Correo-e: aviation@landovercompany.com

Perú. Director Regional de la OACI, Oficina Sudamérica, Apartado 4127, Lima 100
Teléfono: +51 (1) 575 1646; Facsímile: +51 (1) 575 0974; Sitatex: LIMCAYA; Correo-e: mail@lima.icao.int

Reino Unido. Airplan Flight Equipment Ltd. (AFE), 1a Ringway Trading Estate, Shadowmoss Road, Manchester M22 5LH
Teléfono: +44 161 499 0023; Facsímile: +44 161 499 0298 Correo-e: enquiries@afeonline.com; World Wide Web: <http://www.afeonline.com>

Senegal. Directeur régional de l'OACI, Bureau Afrique occidentale et centrale, Boîte postale 2356, Dakar
Teléfono: +221 839 9393; Facsímile: +221 823 6926; Sitatex: DKRCAYA; Correo-e: icaodkr@icao.sn

Sudáfrica. Avex Air Training (Pty) Ltd., Private Bag X102, Halfway House, 1685, Johannesburg
Teléfono: +27 (11) 315-0003/4; Facsímile: +27 (11) 805-3649; Correo-e: avex@iafrica.com

Suiza. Adeco-Editions van Diermen, Attn: Mr. Martin Richard Van Diermen, Chemin du Lacuez 41, CH-1807 Blonay
Teléfono: +41 021 943 2673; Facsímile: +41 021 943 3605; Correo-e: mvandiermen@adeco.org

Tailandia. ICAO Regional Director, Asia and Pacific Office, P.O. Box 11, Samyaeak Ladprao, Bangkok 10901
Teléfono: +66 (2) 537 8189; Facsímile: +66 (2) 537 8199; Sitatex: BKKCAYA; Correo-e: icao_apac@bangkok.icao.int

2/06

Catálogo de publicaciones y ayudas audiovisuales de la OACI

Este catálogo anual comprende los títulos de todas las publicaciones y ayudas audiovisuales disponibles. En los suplementos al catálogo se anuncian las nuevas publicaciones y ayudas audiovisuales, enmiendas, suplementos, reimpressiones, etc.

Puede obtenerse gratuitamente pidiéndolo a la Subsección de venta de documentos, OACI.

Doc 9817
AN/449



Manual sobre cizalladura del viento a poca altura

**Aprobado por el Secretario General
y publicado bajo su responsabilidad**

Primera edición — 2005

Organización de Aviación Civil Internacional

ENMIENDAS

La publicación de enmiendas se anuncia periódicamente en la *Revista de la OACI* y en los suplementos del *Catálogo de publicaciones y ayudas audiovisuales de la OACI*, documentos que deberían consultar quienes utilizan esta publicación. Las casillas en blanco facilitan la anotación.

REGISTRO DE ENMIENDAS Y CORRIGENDOS

[illegible][illegible]

PREÁMBULO

Entre 1964 y 1983,^a se citó la cizalladura del viento a baja altura en por lo menos 28 accidentes o incidentes de grandes aeronaves de transporte en los que, en conjunto, hubo más de 500 muertos y 200 heridos. La comunidad aeronáutica es cada vez más consciente del carácter peligroso e insidioso de este fenómeno, lo cual se pone de manifiesto en el hecho de que el Consejo de la OACI lo consideró entonces como uno de los problemas técnicos más importantes con que se enfrentaba la aviación.

La carencia de equipo operacional adecuado de teledetección, la complejidad de la cuestión, la extensa variedad de escalas de cizalladura del viento y el carácter imprevisible de este fenómeno han contribuido de consuno a que no se haya aún resuelto por completo este problema lo cual, a su vez, ha demorado la elaboración de las normas y métodos recomendados internacionales necesarios para su observación, notificación y predicción.

En 1975, ocurrieron cinco accidentes/incidentes de aviones de reacción de transporte, en los que se citó la cizalladura del viento como causa, en uno de los cuales fue considerable la pérdida de vidas humanas.¹ Este último accidente, ocurrido en el Aeropuerto Internacional John F. Kennedy (JFK) de Nueva York el 24 de junio 1975, y otro ocurrido en Denver (Colorado, Estados Unidos), el 7 de agosto de 1975, en el que no hubo que lamentar pérdidas de vidas y que sobrevino en un área en la que era posible controlar minuciosamente el campo del viento, han marcado un punto crucial en los antecedentes de la cizalladura del viento. El análisis detallado y completo del papel desempeñado por este fenómeno en estos accidentes ha disipado cualquier duda en lo tocante a su peligro real. Los apresurados intentos de investigaciones que se llevaron a cabo seguidamente, y que llegaron a su punto culminante con el proyecto JAWS (*Joint Airport Weather Studies*) de gran envergadura efectuado en el Aeropuerto Stapleton de Denver en 1982, han mejorado nuestra comprensión del problema, especialmente en lo referente a la cizalladura del viento que acompaña a las tormentas.

La octava Conferencia de navegación aérea de la OACI (Montreal, 1974)² recomendó que se elaboraran y publicaran textos de orientación para ayudar a todos los interesados a utilizar lo mejor posible la información disponible sobre cizalladura del viento. Con objeto de contribuir a la preparación de este texto de orientación, se creó el Grupo de estudio sobre la cizalladura del viento y la turbulencia (WISTSG). Con su concurso, se preparó una exposición de requisitos operacionales relativos a la observación y notificación de la cizalladura del viento. Esta exposición, junto con una lista inicial de términos recomendados y sus explicaciones y un informe respecto a la marcha de los trabajos sobre cizalladura del viento, basados esencialmente en circulares publicadas por algunos Estados, se envió a los Estados para su orientación mediante la comunicación AN 10/4.6-79/142 del 31 de agosto de 1979.

De resultados de la intensificación de los trabajos de investigación, se elaboró la Enmienda 64 del Anexo 3 — *Servicio meteorológico para la navegación aérea internacional*, que empezó a aplicarse en noviembre de 1983 y que contenía nuevas disposiciones y una revisión de las disposiciones existentes relativas a la observación y notificación de la cizalladura del viento a baja altura. Al mismo tiempo, la exposición de requisitos operacionales fue ligeramente revisada (véase el Apéndice 1).

a. Al publicarse el presente manual, el año 1983 era el más reciente respecto al cual existían informes completos en el banco de datos de notificación de accidentes/incidentes de la OACI.

En 1982, dos subcomités del Comité de Ciencias y Técnicas de la Cámara de Representantes de los Estados Unidos (Subcommittees on Investigations and Oversight, and on Transportation, Aviation and Materials) celebraron audiencias conjuntas sobre problemas meteorológicos que afectaban a la aviación, incluida la cizalladura del viento. A raíz de dichas audiencias, la *Federal Aviation Administration* (FAA) concertó con la Academia Nacional de Ciencias que efectuara un estudio sobre el estado de conocimientos, las distintas soluciones del problema y las consecuencias de las alertas respecto a cizalladura del viento y condiciones meteorológicas peligrosas en relación con las autorizaciones de despegue y de aterrizaje de las aeronaves comerciales y de la aviación general. Con objeto de llevar a cabo esta tarea, se constituyó un comité *ad hoc* para el estudio de la cizalladura del viento a baja altura y sus peligros para la aviación. Dicho comité publicó un informe sumamente completo y una serie de conclusiones y recomendaciones¹ (véase el Apéndice 2).

Desde 1967 la FAA de los Estados Unidos ha tenido un programa minucioso destinado a aminorar el peligro que significa para la aviación la cizalladura del viento a baja altura. Con arreglo a este programa, se han tomado medidas sobre las recomendaciones del mencionado comité y las que formula periódicamente la *National Transportation Safety Board* (NTSB) al investigar accidentes. A este respecto, la FAA preparó un “*Integrated Wind Shear Programme*”, que requirió estrecha colaboración con varias dependencias gubernamentales [p. ej., la *National Aeronautical and Space Administration* (NASA), la industria aeroespacial, asociaciones de pilotos y la OACI] y abarcaba una ayuda para la instrucción sobre cizalladura de viento, que se publicó en febrero de 1987. El programa tenía por objeto elaborar y mejorar durante los cinco o diez años siguientes los procedimientos de enseñanza, instrucción y operacionales, los medios técnicos de detección de la cizalladura del viento instalados en tierra y de a bordo y sistemas de a bordo de guía del vuelo. Al mismo tiempo, se debía explicar el riesgo que supone la cizalladura del viento mediante constante investigación científica de este fenómeno. En 1987, con la asistencia del WISTSG, la OACI publicó la Circular 186 sobre *Gradiente del viento*, en la que se basa el presente manual.

Al publicarse dicho manual, se señaló en su preámbulo que “la mayor parte de la información disponible sobre el gradiente del viento, y especialmente con respecto a los aspectos operacionales de este fenómeno, no está aún lo suficientemente estudiada para poder convertirla en disposiciones reglamentarias”. Constituyen pruebas de que el tema ha progresado considerablemente las enmiendas subsiguientes a los Anexos y Procedimientos para los servicios de navegación aérea (PANS) pertinentes a fin de tener en cuenta el requisito de proporcionar a los pilotos información sobre la cizalladura del viento y el hecho de que la circular original se ha remplazado por el presente manual.

Dos tendencias principales han dado lugar al progreso logrado en los últimos dieciséis años. El adelanto en el desarrollo de equipo, tanto de tierra como de a bordo, para detectar la cizalladura del viento y emitir avisos, ha tenido lugar desde 1987. En particular, se han logrado avances considerables en los radares Doppler y la tecnología de procesamiento de señales, lo que ha llevado al desarrollo de sistemas de detección y aviso de cizalladura del viento basados en tierra especializados y muy eficaces. Avances semejantes han permitido producir sistemas frontales de detección y aviso de cizalladura del viento para satisfacer los requisitos operacionales para el equipo de a bordo. Se han enmendado los documentos pertinentes de reglamentación de la OACI para tener en cuenta este progreso técnico.

Paralelamente al desarrollo de equipo de detección y aviso de cizalladura del viento, se ha logrado progreso en la instrucción del personal operacional en lo que atañe al grave efecto que la cizalladura del viento puede tener en las aeronaves en vuelo. Reviste particular importancia la instrucción de los pilotos. Se cuenta con excelentes ayudas para la instrucción sobre cizalladura del viento, abarcando la explicación y reconocimiento de la misma y la manera de evitarla en los aterrizajes y despegues. Las técnicas de vuelo que se recomiendan para que el piloto logre el restablecimiento después de un encuentro inesperado con cizalladura del viento forman también parte de la instrucción. Hoy en día, toda instrucción de pilotos mediante simuladores debería abarcar módulos sobre reconocimiento y, modo de evitar la cizalladura del viento, así como técnicas de restablecimiento.

Ha disminuido significativamente en el último decenio el número de accidentes e incidentes de aviación en que se citó la cizalladura del viento como factor contribuyente. Sin embargo, siempre constituirá un grave peligro para la aviación, pudiendo causar víctimas, y debe aplicarse vigilancia constante y seguir formándose a los pilotos al respecto.

Referencias

1. Report by the United States National Academy of Sciences Committee on Low-Altitude Wind Shear and its Hazard to Aviation: 1983, National Academy Press, Washington, D.C., Library of Congress No. 83-63100.
 2. OACI, 1974: Informe de la octava Conferencia de navegación aérea (Doc 9101), Montreal.
-

ÍNDICE

	<i>Página</i>
Capítulo 1. Introducción.....	1-1
Capítulo 2. Características de la cizalladura del viento a poca altura	2-1
2.1 El viento	2-1
2.2 Variación espacial del viento	2-1
2.3 Cálculo de la cizalladura del viento.....	2-3
2.4 Unidades de medida de la cizalladura del viento	2-6
2.5 Limitaciones en la aplicación práctica de los métodos de cálculo de la cizalladura del viento.....	2-7
Capítulo 3. Condiciones y fenómenos meteorológicos que ocasionan cizalladura del viento a poca altura	3-1
3.1 Perfil del viento en los niveles inferiores de la atmósfera	3-1
3.2 Flujo del viento en torno a los obstáculos.....	3-6
3.3 Corrientes aéreas que acompañan a las superficies frontales	3-10
3.4 Brisa de tierra y brisa de mar	3-13
3.5 Tormentas	3-14
3.6 Climatología de la cizalladura del viento convectiva.....	3-32
3.7 Estadísticas sobre la cizalladura del viento a poca altura en la proximidad de los aeródromos	3-33
3.8 Vórtices de estela	3-34
3.9 Efectos aerodinámicos negativos de las fuertes lluvias	3-38
Capítulo 4. Efecto de la cizalladura del viento a poca altura sobre la actuación de la aeronave.....	4-1
4.1 Generalidades	4-1
4.2 Actuación de la aeronave en condiciones particulares de cizalladura del viento.....	4-9
4.3 Actuación de la aeronave en la cizalladura del viento y métodos que permiten reconocer y resolver esas situaciones	4-20
Capítulo 5. Observación, pronóstico y notificación de cizalladura del viento a poca altura.....	5-1
5.1 Observación de la cizalladura del viento — observaciones en tierra y en vuelo	5-1
5.2 Pronósticos de cizalladura del viento.....	5-28
5.3 Notificación de cizalladura del viento.....	5-46

Capítulo 6. Instrucción	6-1
6.1 Generalidades	6-1
6.2 Objetivos de la instrucción de la tripulación de vuelo.....	6-2
6.3 Instrucción en tierra para la tripulación de vuelo	6-2
6.4 Instrucción en vuelo y en simulador	6-3
6.5 Programa integrado de instrucción sobre cizalladura del viento de la FAA	6-5
6.6 Instrucción del personal de control de tránsito aéreo.....	6-5
6.7 Instrucción para meteorólogos	6-6
6.8 Instrucción sobre notificación de cizalladura del viento	6-7
6.9 Resumen	6-7

Apéndices

1. Exposición de requisitos operacionales	AP 1-1
2. Recomendaciones del Comité de la Academia Nacional de Ciencias de los Estados Unidos sobre la cizalladura del viento a baja altitud y sus peligros para la aviación (1983).....	AP 2-1
3. Análisis matemático del efecto de la cizalladura del viento en la sustentación	AP 3-1
4. Alerta de cizalladura del viento y turbulencia en Hong Kong (China).....	AP 4-1
5. Perfilógrafo del viento UHF en el aeropuerto Nice Côte d'Azur	AP 5-1
6. Requisitos de equipo de un sistema de cizalladura del viento a baja altitud	AP 6-1
7. Juegos de datos de simulación de cizalladura del viento	AP 7-1
8. Reglas de pronóstico	AP 8-1
9. Meteorología para controladores de tránsito aéreo y pilotos	AP 9-1
10. Ayudas audiovisuales que pueden obtenerse de la OACI	AP 10-1
11. Procedimientos suplementarios B737 — condiciones meteorológicas desfavorables y maniobras anormales	AP 11-1

Bibliografía

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

1.1 La expresión “cizalladura del viento a poca altura”, en el sentido más amplio, abarca una familia de movimientos del aire en las capas inferiores de la atmósfera, que varían desde remolinos y rafagosidad a pequeña escala, que pueden afectar a las aeronaves en la forma de turbulencia, hasta la circulación a gran escala de una capa de aire en relación con otra adyacente. Entre los fenómenos de gran diversidad que pueden producir estos movimientos atmosféricos se pueden citar las tormentas, las brisas de tierra o de mar, las corrientes en chorro a baja altura, las ondas orográficas y los sistemas frontales. Para comprender, en este contexto, el denominador común que enlaza fenómenos tan variados, es necesario explicar el significado de la expresión “cizalladura del viento”. La definición más corriente es la siguiente: cambio de la velocidad o de la dirección del viento en el espacio, incluso las corrientes ascendentes y las corrientes descendentes. Se sigue que cualquier fenómeno atmosférico o cualquier obstáculo material a la circulación del viento, que produzca un cambio en su velocidad o dirección, ocasiona cizalladura del viento.

1.2 La cizalladura del viento está siempre presente en la atmósfera y su presencia es frecuentemente visible para el observador. Constituyen ejemplos las capas de nubes a distintas alturas que circulan en diferentes direcciones; los penachos de humo “cizallados” y que evolucionan en distintas direcciones a diferentes alturas; los residuos en suspensión o las gotas de agua en rotación en los remolinos de polvo, relativamente inofensivos, y en las trombas marinas y los tornados, sumamente peligrosos; el frente de tempestades de polvo o de arena que se levantan como un muro y los árboles que se inclinan en todas direcciones en reacción a las brucas ráfagas de una línea de turbonada. Todos estos efectos visibles son testimonio de la presencia universal de la cizalladura del viento y de los fenómenos que la causan en la atmósfera.

1.3 La importancia de la cizalladura del viento en la esfera de la aviación se justifica por sus efectos en la actuación de las aeronaves, con las consecuencias negativas que ello puede tener para la seguridad de los vuelos. Si bien la cizalladura del viento puede hallarse en todos los niveles de la atmósfera, su presencia en la capa inferior [500 m (1 600 ft)] es el que reviste importancia especial para las aeronaves que aterrizan y despegan. Durante las fases de ascenso y de aproximación, la velocidad aerodinámica y la altura de las aeronaves se acercan a valores críticos, por lo que las aeronaves son especialmente vulnerables a los efectos negativos de la cizalladura del viento. Como se verá en los capítulos siguientes, la reacción de las aeronaves a la cizalladura del viento es sumamente compleja y depende de numerosos factores, entre ellos tipo de aeronave, fase de vuelo, escala en la que se produce la cizalladura del viento respecto a las dimensiones de la aeronave e intensidad y duración de la cizalladura del viento.

1.4 Una vez señalada a la atención la presencia generalizada de la cizalladura del viento en la atmósfera y los peligros que este fenómeno puede presentar para las aeronaves, cabe indicar, para mantener las cosas en su debida perspectiva, que si se tiene en cuenta el elevado número de despegues y aterrizajes en todo el mundo, son muy pocas las aeronaves que encuentran dificultades que causen un accidente y que la cizalladura del viento es un factor en una fracción de estos accidentes. No obstante, dado que la cizalladura del viento ha contribuido a accidentes de aviación, es motivo más que suficiente para que todos los que intervienen en las operaciones aeronáuticas comprendan las consecuencias impresionantes que la cizalladura del viento puede tener en la actuación de las aeronaves, especialmente durante las fases de aterrizaje y despegue.

Capítulo 2

CARACTERÍSTICAS DE LA CIZALLADURA DEL VIENTO A POCA ALTURA

2.1 EL VIENTO

2.1.1 La definición más simple del viento es “movimiento del aire respecto a la superficie de la tierra”. El viento sopla libremente en un espacio tridimensional y, puesto que posee a la vez velocidad y dirección, debe considerarse como un vector que puede resolverse en tres componentes ortogonales. Respecto a la tierra, se trata de componentes de las direcciones norte/sur, este/oeste y hacia arriba/hacia abajo. Respecto a la trayectoria de vuelo de una aeronave, se trata de componentes de viento de frente/viento de cola (longitudinales) de componentes de viento de costado izquierda/derecha (laterales) y componentes de corrientes ascendentes/descendentes (verticales) (véase la Figura 2-1).

2.1.2 Salvo en casos especiales, la componente vertical del viento en la atmósfera suele ser pequeña en relación con una o ambas componentes horizontales, particularmente en la proximidad del suelo, donde el viento es forzado a circular en el plano horizontal. Como, por lo general, suelen predominar las componentes horizontales, se supone que un viento horizontal sopla paralelamente a la superficie de la tierra, descuidando así la componente vertical. Los casos especiales en los que predomina la componente vertical del viento se deben a causas como nubes convectivas (especialmente tormentas), ondas orográficas y térmicas. Los dos primeros de estos fenómenos están especialmente relacionados con la cizalladura del viento y se examinan de manera detallada en el Capítulo 3.

2.1.3 Dado que la aeronave, por la elección apropiada de pista, suele siempre aterrizar o despegar enfrentando al viento, la componente longitudinal de viento de frente/de cola tiene sistemáticamente la tendencia a predominar sobre la componente de viento de costado o componente lateral. Debido a ello, se insiste normalmente en los cambios de la componente de viento de frente/de cola (longitudinal), salvo en los casos especiales ya mencionados y en que predomina la componente vertical (corrientes ascendentes/descendentes). Además, al calcular la cizalladura del viento en el aeropuerto, debe tenerse en cuenta la orientación de las pistas, lo que significa resolver todos los vectores cizalladura respecto a los rumbos de la pista, proporcionando así cizalladura en forma de componentes viento de frente/viento de cola.

2.2 VARIACIÓN ESPACIAL DEL VIENTO

2.2.1 En la explicación de la cizalladura del viento en el Capítulo 1, los cambios de velocidad o dirección del viento se relacionan con cambios en el viento medio (o dominante) de un punto de referencia en el espacio a otro. Las fluctuaciones de corta duración del viento respecto a una dirección o velocidad media se suelen denominar “variaciones” respecto al viento dominante y tienen, al menos aisladamente, carácter temporal como remolinos; si bien estos últimos suponen una cizalladura del viento, por ser de una escala mucho más pequeña que una aeronave, tienen la tendencia a afectar a la aeronave en la forma de turbulencia o sacudidas. La escala a la cual se manifiesta la cizalladura del viento, en relación con las dimensiones generales de las aeronaves tiene, por consiguiente, importancia fundamental.

2.2.2 De lo expuesto resulta también que, aun cuando toda turbulencia lleva aparejada cizalladura del viento, aun a muy pequeña escala, las cizalladuras del viento, especialmente a gran escala, no van acompañadas forzosamente de turbulencia. La cizalladura del viento no es únicamente cierta forma de turbulencia en aire claro; además, la cizalladura del viento a una escala que afecte a la actuación de la aeronave no entraña necesariamente turbulencia.¹

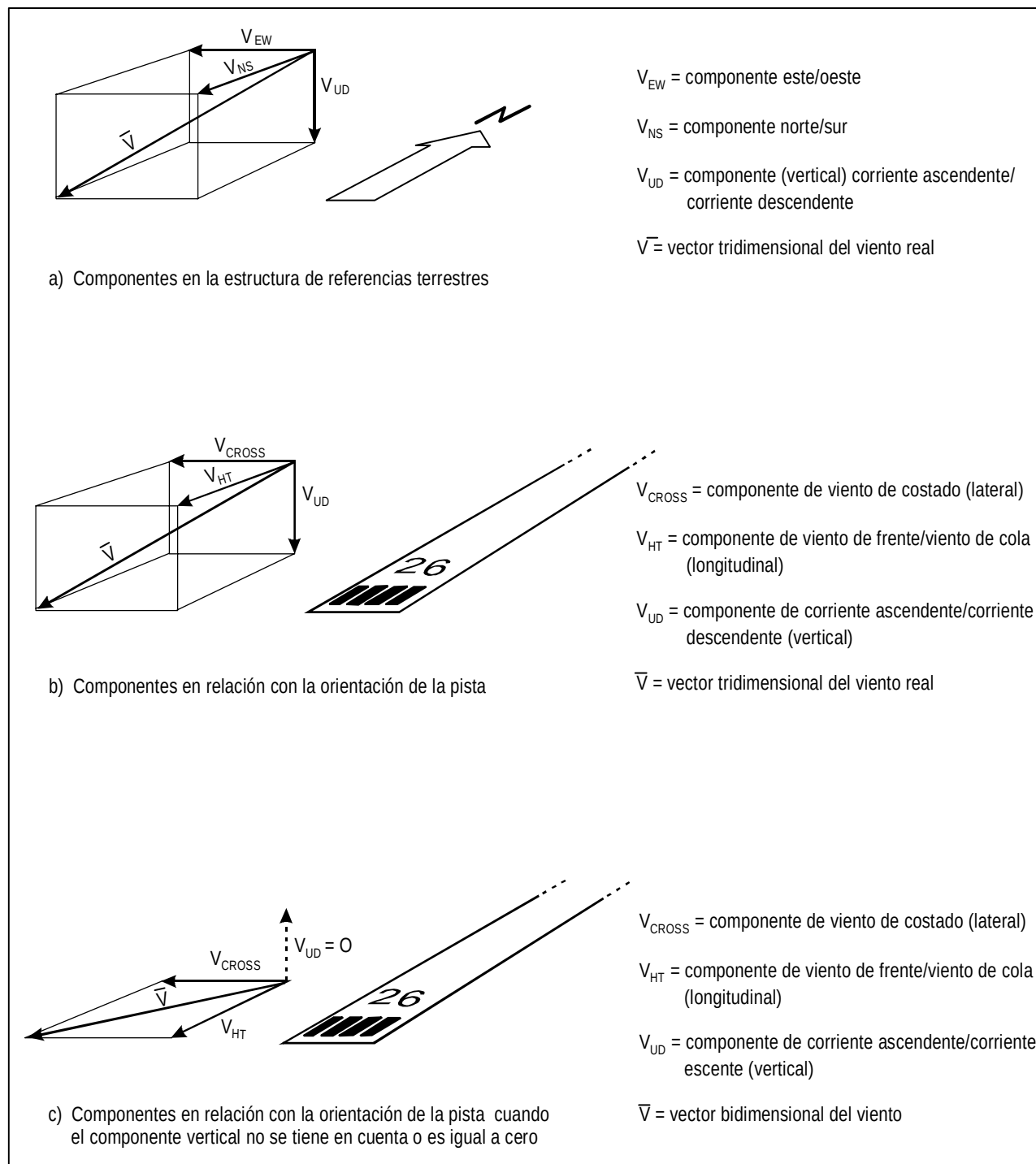


Figura 2-1. Componentes del viento en diversos sistemas de coordenadas

2.3 CÁLCULO DE LA CIZALLADURA DEL VIENTO

2.3.1 La cizalladura del viento, que es el cambio del vector viento de un punto en el espacio a otro, viene dada por la diferencia entre los vectores viento en los dos puntos, la cual es por sí misma un vector (por tener al mismo tiempo velocidad y dirección). La intensidad de la cizalladura del viento se calcula dividiendo la magnitud de la diferencia entre los vectores en los dos puntos por la distancia que los separa, utilizando unidades compatibles. El cálculo de la cizalladura puede efectuarse en forma gráfica sirviéndose del triángulo de las velocidades o mediante sustracción de las componentes de los dos vectores viento, ya sea manualmente o mediante computadora o por el método trigonométrico. Por ejemplo, consideremos un viento $\bar{V}_1^a$ de $240^\circ/60$ km/h (30 kt) en el punto A a 300 m (1 000 ft) por encima del nivel del suelo (AGL), que cambia a un viento $\bar{V}_2$ de $220^\circ/20$ km/h (10 kt) en el punto B a 150 m (500 ft) AGL. En la Figura 2-2 a) y b), el vector cizalladura del viento se calcula gráficamente por sustracción de los dos vectores viento ($\bar{V}_2 - \bar{V}_1$) o ($\bar{V}_1 - \bar{V}_2$); se indica también su relación con el vector “viento resultante”, que se obtiene de la suma de los dos vectores viento ($\bar{V}_1 + \bar{V}_2$). La resultante únicamente puede tener una sola dirección, ya que $(\bar{V}_1 + \bar{V}_2) = (\bar{V}_2 + \bar{V}_1)$, pero la diferencia de los vectores puede tener una u otra de dos direcciones recíprocas (con la misma velocidad), según se haga la sustracción de uno u otro de los dos vientos (dicho de otro modo, ello depende del sentido en que el observador se traslada, del punto A al punto B o viceversa), puesto que $(\bar{V}_2 - \bar{V}_1) \neq (\bar{V}_1 - \bar{V}_2)$ salvo en el caso trivial $\bar{V}_1 = \bar{V}_2$, en que no hay cizalladura.

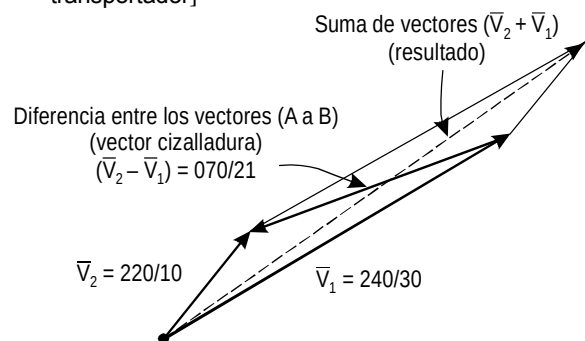
2.3.2 El hecho de que la diferencia de los vectores o el vector cizalladura del viento puede tener dos direcciones recíprocas, según el sentido del cambio del viento, tiene importancia por sus efectos en las aeronaves (véase el Capítulo 4 para más detalles). En 2.3.1 puede verse fácilmente que el vector cizalladura del viento para un aterrizaje del punto A al punto B sería $(\bar{V}_2 - \bar{V}_1)$, mientras que para un despegue del punto B al punto A, sería $(\bar{V}_1 - \bar{V}_2)$, es decir, que la velocidad sería la misma en los dos casos, si bien la dirección sería en cada caso la recíproca de la otra. En la Figura 2-2, se ilustra el cálculo de la diferencia de los vectores utilizando componentes y fórmulas normalizadas, respectivamente. En la práctica, se dispone normalmente de tablas calculadas previamente que permiten obtener la magnitud de la cizalladura del viento a partir de las velocidades de los dos vientos y del ángulo formado entre ellos [véase la Figura 2-2 c) y párrafo 2.1.3].

2.3.3 El párrafo 2.3.2 ilustra la cizalladura del viento en el plano vertical tal como lo mediría un anemómetro situado a 300 m (1 000 ft) y otro a 150 m (500 ft) AGL. Podría hacerse el mismo cálculo para una cizalladura del viento en el plano horizontal, es decir, si ambos anemómetros tuviesen una separación de 150 m (500 ft) entre sí a nivel del suelo. Dado los mismos valores del viento ($240/30$ y $220/10$), se obtendría exactamente el mismo vector cizalladura del viento y su dirección dependería nuevamente de que el observador se trasladara del punto A al punto B o viceversa, como en el ejemplo en 2.3.2.

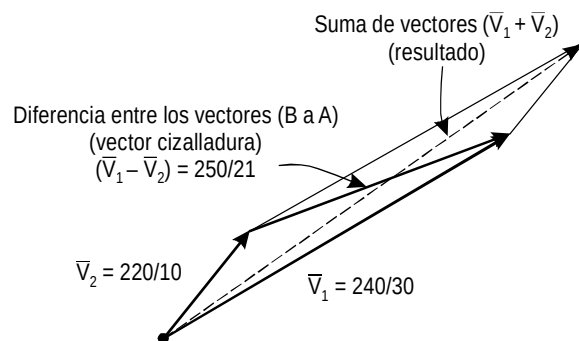
2.3.4 No se podría insistir demasiado en el hecho de que la cizalladura del viento es un **vector** y que, por lo tanto, debe tenerse en cuenta la velocidad y la dirección de los dos vientos de que se trate. No es posible calcular la cizalladura del viento por simple sustracción escalar de las velocidades del viento, excepto en el caso concreto en que la dirección de ambos vientos sea exactamente la misma o las direcciones sean exactamente recíprocas. Por último, cabe observar que el gradiente escalar (es decir, la sustracción directa de las velocidades del viento, sin tener en cuenta sus direcciones) es siempre inferior o igual a la cizalladura vectorial y que, por lo tanto, en la mayoría de los casos se subestima la magnitud real de la cizalladura.

a. El vector se indica como $\bar{V}$.

I. **Por construcción** [trácese a escala y médase la magnitud (velocidad) y la dirección sirviéndose de una regla y de un transportador]



a) Punto A a Punto B



b) Punto B a Punto A

El método gráfico más simple consiste en trazar los vientos en un diagrama polar, es decir, como una "hodográfica" (véase ejemplo en la Figura 3-2).

II. **Por cálculo**

a) A partir de las componentes:

		Componentes este/oeste	Componentes norte/sur
1 000 ft AGL	Punto A, $\bar{V}_1 = 240/30$	+26	+15
500 ft AGL	Punto B, $\bar{V}_2 = 220/10$	+6,4	+7,7

Nota.— Los signos de las componentes son los recíprocos de los signos convencionales trigonométricos usuales, siendo la dirección del viento la dirección de la cual sopla el viento.

La diferencia entre los vectores del punto A al punto B (p. ej., en el sentido del aterrizaje) = $\bar{V}_2 - \bar{V}_1$.

La componente este/oeste de la diferencia entre los vectores = $(6,4 - 26) = -19,6$.

La componente norte/sur de la diferencia entre los vectores = $(7,7 - 15) = -7,3$.

Magnitud (velocidad) de la diferencia entre los vectores = $\bar{V}_2 - \bar{V}_1 = \sqrt{(-19,6)^2 + (-7,3)^2} = 20,9 = 21 \text{ kt}$.

Dirección de la diferencia entre los vectores = $\bar{V}_2 - \bar{V}_1 = \tan^{-1} \frac{(-7,3)}{(-19,6)} = 20^\circ$.

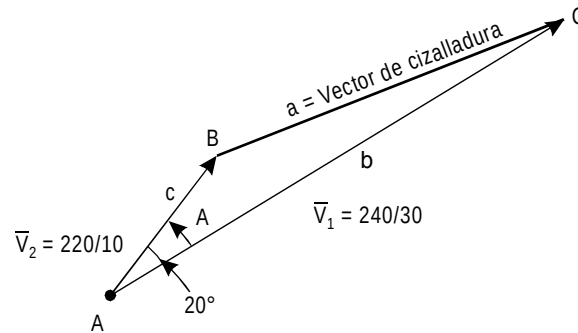
Puesto que las dos componentes de la diferencia entre los vectores (cizalladura) son negativas, la dirección de la cizalladura del viento es del cuadrante nordeste, y porque la componente este/oeste $\geq$ que la componente norte/sur, la dirección = $(090 - 020) = 070^\circ$.

Vector cizalladura del viento del punto A al punto B (aterrizaje) = 070/21.

Vector cizalladura del viento del punto B al punto A (despegue) = 250/21.

Figura 2-2. Cálculo de la cizalladura del viento

b) Por cálculo trigonométrico:



Este es un caso en que se conocen dos lados de un triángulo y el ángulo que forman.
El lado "b" = 30, el lado "c" = 10 y el ángulo entre los vientos $\bar{V}_1$ y $\bar{V}_2 = 240^\circ - 220^\circ$
 $A = 20^\circ$

En trigonometría, en tal triángulo se tiene

$$a^2 = b^2 + c^2 - 2bc \cos A$$

[donde "a" es la magnitud de la diferencia entre vectores (cizalladura)],

$$\begin{aligned} \therefore \text{velocidad de la cizalladura} &= "a" \text{ la cual} = \sqrt{b^2 + c^2 - 2bc \cos A} \\ &= \sqrt{900 + 100 - 600 \cdot (0,9397)} \\ &= \sqrt{436,2} = 20,9 \\ &= 21 \text{ kt.} \end{aligned}$$

Conociéndose ya los tres lados del triángulo ($a = 21$, $b = 30$ y $c = 10$), se puede hallar como sigue la dirección del vector cizalladura:

$$b^2 = a^2 + c^2 - 2ac \cos B$$

$$B = \cos^{-1} \left[\frac{a^2 + c^2 - b^2}{2ac} \right] = \frac{-363}{418} = -0,8684 = 150^\circ.$$

Con arreglo a la configuración geométrica del diagrama, la dirección del vector cizalladura = $(180^\circ - 150^\circ + 40^\circ)$ = 070° (o recíprocamente 250° según el orden de sustracción de los vectores viento).

Figura 2-2. Cont.

2.4 UNIDADES DE MEDIDA DE LA CIZALLADURA DEL VIENTO

2.4.1 En la Figura 2-2, la cizalladura del viento entre los puntos A y B es de $070^\circ/42 \text{ km/h}$ (21 kt), y entre los puntos B y A de $250^\circ/42 \text{ km/h}$ (21 kt). La intensidad de la cizalladura en ambos casos es $21/5 = 8,4 \text{ km/h por } 30 \text{ m}$ (4,2 kt por 100 ft). Es práctica corriente dar la intensidad de la cizalladura del viento en kilómetros por hora por 30 m o en metros por segundo por 30 m, o en nudos por 100 ft, puesto que estas unidades son cómodas y fáciles de comprender para el personal aeronáutico. En el caso de las aeronaves que aterrizan o que despegan en un punto en que la trayectoria de planeo o la trayectoria de despegue corresponde a un ángulo fijo conocido, por ejemplo, trayectoria de planeo de 3° , y es conocida y relativamente constante la velocidad de la aeronave respecto al suelo (GS), se puede efectuar la conversión de la cizalladura del viento de kt/100 ft o m/s por 30 m a kt/s o a m/s por s, lo que da la intensidad de la cizalladura del viento en unidades de aceleración (es decir, cambio de velocidad en el tiempo), lo cual es especialmente útil para los pilotos (véase la Figura 4-5).²

2.4.2 Pueden obtenerse otras unidades de medida de la cizalladura del viento, frecuentemente empleadas por los investigadores y que, por consiguiente, figuran en los informes de investigaciones y en publicaciones científicas, mediante un análisis dimensional, como se indica a continuación:

$$\text{Cizalladura del viento} = (\text{p. ej.,}) \text{ kt por } 100 \text{ ft es decir: } \frac{\text{unidades de velocidad}}{\text{unidades de distancia}} = \frac{L/T}{L} = \frac{1}{T}$$

Donde

L = longitud, y
 T = tiempo.

Por consiguiente, las unidades pueden expresarse en s^{-1} . Mientras que en lenguaje científico s^{-1} debe considerarse como la unidad apropiada de medición de la cizalladura del viento, desde el punto de vista físico, la unidad es de difícil interpretación y en la práctica no es especialmente útil en la esfera de las operaciones de aeronaves.

2.4.3 Si se resumen las tres formas de expresar la intensidad de la cizalladura del viento examinadas en 2.4.1 y 2.4.2 en relación con el ejemplo dado en la Figura 2-2, en el caso de un viento que cambia de $\bar{V}_1$ en el punto A a $\bar{V}_2$ en el punto B (p. ej., en el aterrizaje), el vector cizalladura del viento entre los puntos A y B es $070^\circ/42 \text{ km/h}$ (21 kt) por encima de 150 m (500 ft), por consiguiente:

- la intensidad en $\text{km/h por } 30 \text{ m} = 8,4 \text{ km/h por } 30 \text{ m}$ o en $\text{kt/100 ft} = 4,2 \text{ kt/100 ft}$;
- la misma intensidad en unidades científicas = $0,07 \text{ m/s}$; y
- la intensidad, tal como afectaría a una aeronave en el aterrizaje, en km/h por s (kt/s) (es decir, aceleración) para una trayectoria de planeo de 3° y una velocidad respecto al suelo de 300 km/h (150 kt) (es decir, una velocidad de descenso de $3,9 \text{ m/s}$ (13 ft/s) = $1,09 \text{ km/h por s}$ (0,546 kt/s) o $0,025 g$, donde g = aceleración debida a la gravedad. Deben calcularse las componentes reales de cizalladura viento de frente/viento de cola resolviendo la diferencia entre los vectores a lo largo de los rumbos de la pista.

2.4.4 Cabe hacer la observación de que la cizalladura del viento que se ha examinado hasta ahora se origina en la atmósfera libre y que existe independientemente de la presencia de una aeronave. En realidad, los meteorólogos utilizan estas cizalladuras del viento al trazar holográficas o calcular el viento térmico. En estos casos, se calcula la cizalladura entre los vientos que soplan en dos niveles de la atmósfera efectuando la sustracción del vector viento en el nivel inferior del vector viento en el nivel superior, es decir, $(\bar{V}_1 - \bar{V}_2)$ en el ejemplo dado en 2.3.1. En el Capítulo 4, donde se examina el efecto de la cizalladura del viento en la actuación de una aeronave, resulta importante la dirección del vector cizalladura del viento en relación con la trayectoria de vuelo de la aeronave. En particular, como se mencionó en 2.4.3 c), el vector cizalladura debe resolverse a lo largo de la orientación de la pista a fin de tener en cuenta la derrota de vuelo de la aeronave durante el despegue y el aterrizaje.

2.5 LIMITACIONES EN LA APLICACIÓN PRÁCTICA DE LOS MÉTODOS DE CÁLCULO DE LA CIZALLADURA DEL VIENTO

2.5.1 Los métodos de cálculo de la cizalladura del viento expuestos en 2.3 sólo pueden utilizarse cuando se dispone de información sobre el viento en dos puntos en el espacio, obtenida, por ejemplo, de un informe de aeronaves en el descenso, un informe de radioviento sonda o de los datos de dos anemómetros colocados a distintos niveles en un mástil o espaciados a lo largo de una pista. Esto limita considerablemente la utilidad práctica de estos métodos, puesto que no se dispondrá, por lo general, de información sobre los vientos en determinados puntos que interesan. Desde el punto de vista de las operaciones existen otras dos limitaciones que también deben tenerse en cuenta. En el cálculo de la cizalladura de dos vientos en puntos separados por determinada distancia se obtiene simplemente la cizalladura global ente los dos puntos. Ello no indica si el índice de la cizalladura es lineal o, de no serlo, si es por lo menos progresivo entre los puntos considerados, o si esencialmente se produce en una corta distancia en alguna parte entre estos puntos. Por consiguiente, el cálculo no da forzosamente la cizalladura máxima en la capa de aire, que es lo que el piloto necesita saber. La Figura 2-3 ilustra este problema utilizando la cizalladura del viento calculado anteriormente en la Figura 2-2.

2.5.2 En el caso 1 de la Figura 2-3, la cizalladura entre 300 m (1 000 ft) y 150 m (500 ft) es aproximadamente lineal y la cizalladura global de 42 km/h (21 kt) que ha sido calculado a razón de 8,4 km/h por 30 m (4,2 kt/100 ft) (basado en los dos únicos vientos conocidos en los puntos A y B), reproduce muy bien las condiciones reales. No ocurre lo mismo en los casos 2 y 3 donde, aun cuando la cizalladura global calculada es aún 42 km/h (21 kt) u 8,4 km/h por 30 m (4,2 kt/100 ft), se encuentra concentrada en 60 m (200 ft) en una cizalladura del viento local insospechada muy superior a 8,4 km/h por 30 m (4,2 kt/100 ft) en los ejemplos dados y alcanza un máximo de 21 km/h por 30 m (10,5 kt/100 ft). Sin embargo, en la práctica la cizalladura del viento lineal o por lo menos gradual a baja altura representa el caso más típico, mientras que la no lineal es la excepción en determinadas condiciones (véase 3.1.5).

2.5.3 La segunda limitación se refiere al cálculo de la cizalladura del viento basado en los vientos observados por radiovientosonda o por globo piloto.³ Estos vientos representan ya los vientos medios para capas sucesivas de la atmósfera, obteniéndose por interpolación⁴ los vientos para determinados niveles, por lo que tal vez no indiquen la cizalladura real del viento entre dos niveles en particular.

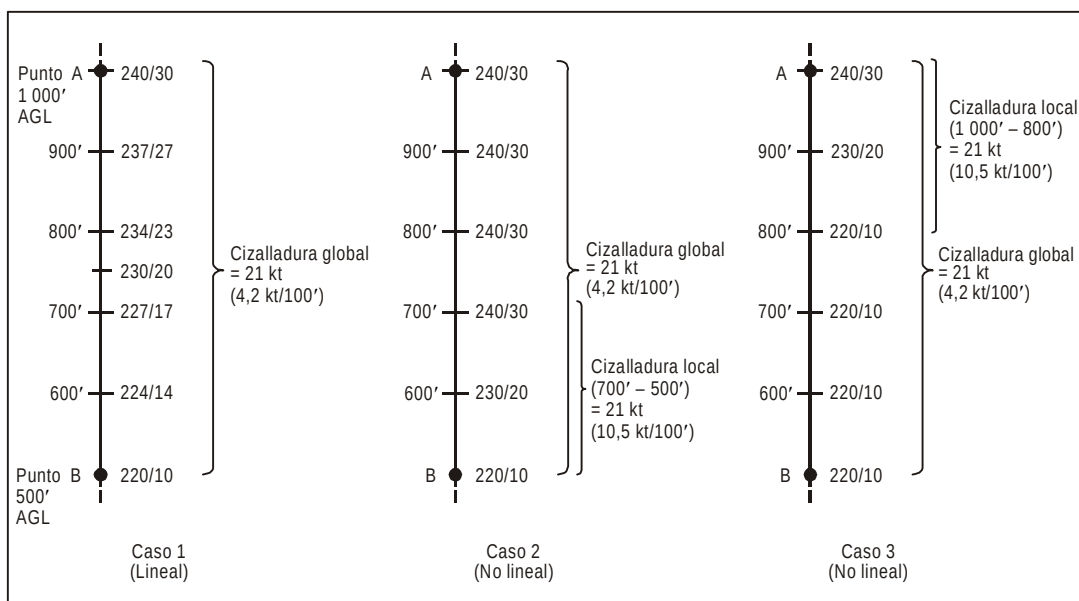


Figura 2-3. Cizalladura del viento lineal y no lineal

Referencias

1. Melvin, 1975: The dynamic effect of wind shear, *Pilot Safety Exchange Bulletin*, Flight Safety Foundation Inc., Arlington, VA.
 2. Carter, 1977: *Aerospace Safety*.
 3. Jaspersen, 1982: The limiting accuracy of wind profiles obtained by tracking rising balloons, *Journal of Applied Meteorology*.
 4. Organización Meteorológica Mundial — Compendium of lecture notes, 1971: Determination of upper winds at specified levels, WMO No. 291.
-

Capítulo 3

CONDICIONES Y FENÓMENOS METEOROLÓGICOS QUE OCASIONAN CIZALLADURA DEL VIENTO A POCA ALTURA

3.1 PERFIL DEL VIENTO EN LOS NIVELES INFERIORES DE LA ATMÓSFERA

GENERALIDADES

3.1.1 Es un hecho bien conocido que, aun fuera de la influencia de determinados fenómenos meteorológicos que ocasionan cizalladura del viento, ésta se encuentra siempre presente en la atmósfera, aunque en circunstancias normales no entraña dificultades para el piloto. Ello puede observarse especialmente a menos de 600 m (2 000 ft), donde la resistencia al avance debida a la fricción ejercida en la capa de aire más cercana a la superficie terrestre ocasiona cambios tanto en la velocidad como en la dirección del viento con la altura. A esta capa se le suele denominar “capa de fricción”, la cual a su vez puede subdividirse como sigue:

- a) la “capa límite de superficie”, que se extiende desde la superficie terrestre hasta una altura aproximada de 100 m (330 ft), en la cual el movimiento del aire se rige principalmente por la fricción con la superficie terrestre; y
- b) la “capa de Ekman”^a, que se extiende desde unos 100 m (330 ft) hasta una altura de por lo menos 600 m (2 000 ft), en la cual el efecto de fricción, aun cuando sigue siendo importante, disminuye progresivamente a medida que aumenta la altura, en tanto que otros factores determinantes, tales como la fuerza de coriolis y la fuerza del gradiente horizontal de presión, adquieren cada vez más importancia.

3.1.2 En toda la capa de fricción, la velocidad del viento tiene tendencia a aumentar con la altura, produciéndose el cambio más importante inmediatamente por encima de la superficie terrestre, en la capa límite de superficie. En esta capa la dirección del viento tiende a permanecer constante con la altura, pero, en toda la capa de Ekman, tiende a girar en el sentido de las agujas del reloj con la altura en el hemisferio norte y en el sentido contrario en el hemisferio sur.

LA CAPA LÍMITE DE SUPERFICIE

3.1.3 En la capa más baja de la atmósfera, por debajo de unos 100 m (330 ft), la dirección del viento es aproximadamente constante con la altura, mientras que se ha observado un aumento de su velocidad con la altura y que este cambio es sumamente más rápido inmediatamente por encima de la superficie.¹

a. V. Walfrid Ekman (1874–1954), oceanógrafo físico sueco, conocido principalmente por sus estudios sobre corrientes oceánicas.

Hay algunas dificultades para obtener, a base de principios físicos, una relación teórica entre la velocidad del viento y su altura en la capa límite de superficie, en todas las condiciones posibles de estabilidad.² Sin embargo, es relativamente simple calcular esta relación para la condición especial de estabilidad neutra (es decir, ni estable ni inestable), en la que el gradiente adiabático real se supone igual al gradiente adiabático seco en el aire no saturado, e igual al gradiente adiabático saturado en el aire saturado (y el movimiento vertical debido a las fuerzas ascensionales es reducido comparado con el movimiento horizontal). Estas condiciones se satisfacen aproximadamente en la capa límite de superficie siempre que los vientos sean lo suficientemente fuertes para garantizar una mezcla turbulenta. Si el viento es muy flojo, especialmente en condiciones de calma acompañado de inversiones acentuadas a baja altura, no se establece una capa estable neutra, y la teoría no se puede aplicar. Suponiendo que la atmósfera sea estable y neutra en la capa límite de superficie, la variación teórica de la velocidad del viento con la altura viene dada entonces por la siguiente ecuación:

$$u = \frac{u_*}{k} \ln \frac{z}{z_o}$$

donde

u = es la velocidad del viento en la altura z ,

u_* = es la “velocidad de fricción”,

k = es la constante de von Karman^b, aproximadamente 0,38,

z_o = es la longitud de aspereza, que depende de la naturaleza (aspereza) de la superficie de que se trate.

Esta ecuación, denominada “ley logarítmica del viento” o “ecuación de Prandtl”^c, permite obtener el perfil logarítmico de la velocidad del viento, que es bien conocido.

3.1.4 La ley logarítmica del viento concuerda muy bien con el perfil de la velocidad del viento en la capa límite de superficie, siempre que se satisfaga la condición de estabilidad neutra. En los casos en que es inestable la capa límite de superficie, la cizalladura de la velocidad del viento con la altura será inferior a lo previsto conforme a la anterior ecuación y superior en condiciones estables [véase la Figura 3-1 a)].³

3.1.5 Un caso extremo de la condición estable, que puede afectar a la totalidad de la capa de fricción, se produce cuando la estabilidad es tan acentuada (p. ej., al formarse una intensa inversión debida a la radiación a baja altura durante la noche) que cesa la mezcla turbulenta y la transferencia de cantidad de movimiento procedente de la corriente a gran escala por encima de la inversión. Esto causa vientos en la superficie más flojos o en calma y, puesto que el viento que sopla por encima de la inversión queda efectivamente desprendido de los efectos retardadores de la fricción en la superficie, se produce un máximo de velocidad del viento por encima de la inversión (véase la Figura 3-1 b)).^{4,5} En algunos casos, por ejemplo si la corriente de aire que cruza extensas llanuras ha sido desviada por una cadena de montañas, el viento máximo se concentra en una banda relativamente estrecha, parecida a una corriente en chorro. A estos vientos máximos se les suele denominar “corrientes en chorro a baja altura”. Como la velocidad máxima puede ser superior a 120 km/h (60 kt), esta descripción parece ser apropiada. Esta terminología se utilizó por primera vez para describir las máximas del viento a baja altura del tipo chorro que se encuentran frecuentemente por encima de la región llamada Great Plains y en otras regiones en los Estados Unidos, así como en los países escandinavos y a lo largo de la costa oriental de Arabia Saudita. En tales casos, la cizalladura por debajo del chorro puede ser significativa y es proporcional a la magnitud de la inversión.⁶ Como el viento máximo suele soplar por debajo de 500 m (1 600 ft), este caso tiene un interés considerable para la aviación.

b. Theodore von Karman (1881–1963), ingeniero húngaro conocido por haber aplicado matemáticas y física a la aeronáutica.

c. Ludwig Prandtl (1875–1953), físico alemán que contribuyó considerablemente a la aerodinámica.

3.1.6 La ley logarítmica del viento no tiene únicamente interés teórico, sino que también proporciona un modelo básico de cizalladura del viento para su utilización en la homologación mediante simuladores de sistemas de aterrizaje automático^d, así como para la instrucción de los pilotos. Sin embargo, debe ponerse de relieve que, en todos los casos en que se utilice este modelo para simulaciones, el cambio en la cizalladura del viento con la altura será gradual y continuo; en los aterrizajes simulados contra un viento de frente en la superficie habrá siempre un viento de frente decreciente durante el descenso, mientras que en los despegues simulados contra un viento de frente en la superficie, el viento de frente aumentará siempre con la altura; por definición, no habrá nunca variación en la dirección del viento dentro de la capa. No obstante, teniendo en cuenta estas limitaciones, el modelo representa las condiciones medias más probables que el piloto puede encontrar en los niveles más bajos de la atmósfera por debajo de 100 m (330 ft). En el perfil logarítmico, la cizalladura del viento alcanza el valor máximo por debajo de 30 m (100 ft) y disminuye con la altura; la intensidad de la cizalladura puede ser superior a 10 km/h por 30 m (5 kt/100 ft) en los primeros 15 m (50 ft) y disminuir a menos de 2 km/h por 30 m (1 kt/100 ft) por encima de 100 m (330 ft). En el Capítulo 6 se examina la cuestión de la realización de modelos destinados a las simulaciones basados en cizalladuras del viento más anormales.

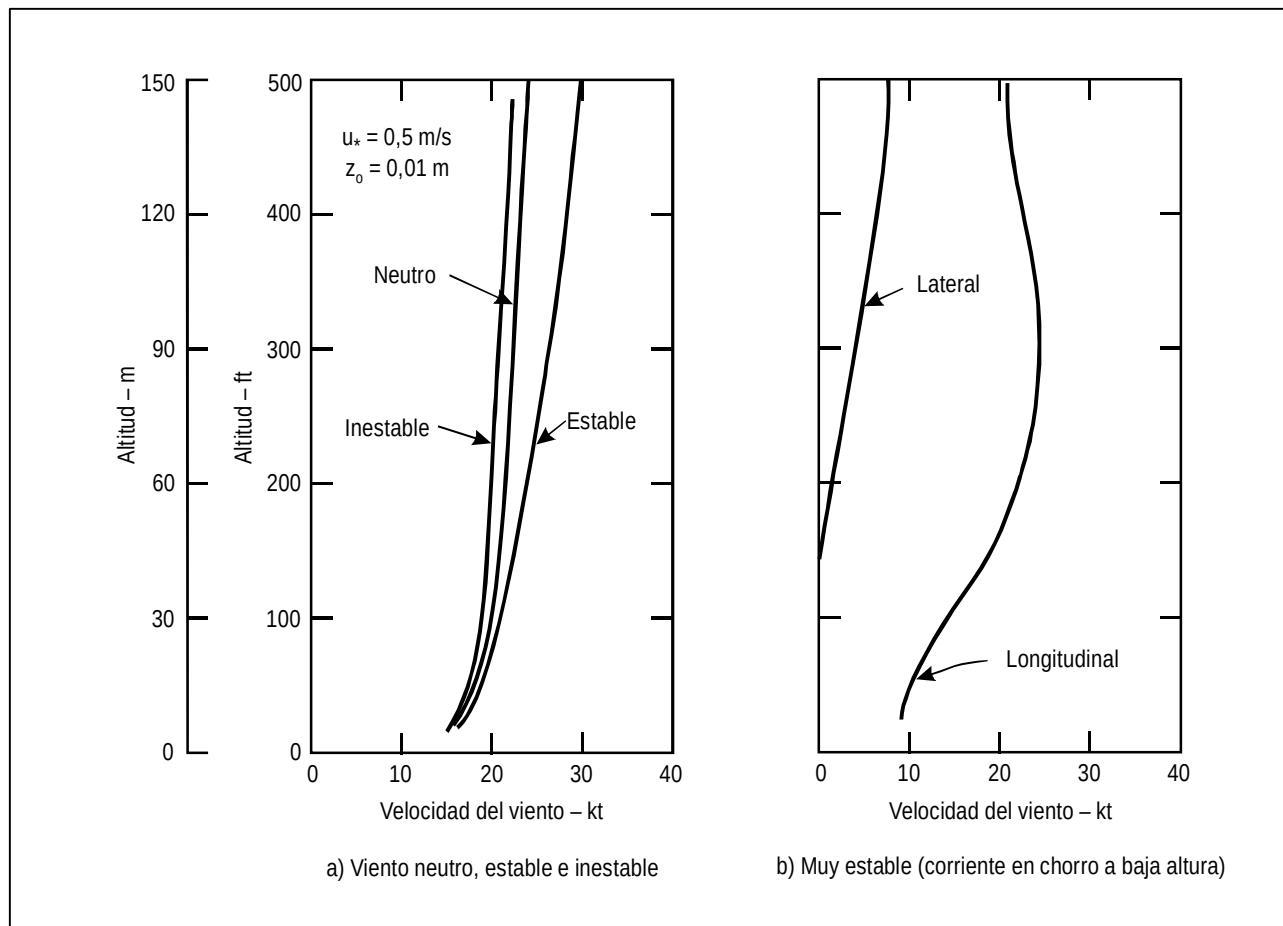


Figura 3-1. Perfiles del viento con arreglo a los efectos en la capa límite de la atmósfera
(según Ellis y Keenan, 1978)

d. Véase el *Manual de aeronavegabilidad* (Doc 9760), Volumen II, Parte A, Apéndice L del Capítulo 4.

LA CAPA DE EKMAN

3.1.7 Por encima de la capa límite de superficie, desde una altura aproximada de 100 m (330 ft) hasta una altura de casi 600 m (2 000 ft), el efecto de fricción en el viento disminuye rápidamente con la altura, y el gradiente horizontal de presión y las fuerzas de coriolis son cada vez más dominantes. Al igual que en el caso de la capa límite de superficie, la velocidad del viento aumenta con la altura entre 100 m (330 ft) y 600 m (2 000 ft) a medida que disminuye el efecto de fricción. Sin embargo, su dirección no permanece constante con la altura, como se había supuesto en la capa límite de superficie, sino que gira en el sentido de las agujas del reloj con la altura en el hemisferio norte y en el sentido contrario en el hemisferio sur.

3.1.8 La teoría que permite explicar estos efectos matemáticamente fue elaborada inicialmente por Ekman y es aplicable a la capa de la atmósfera comprendida aproximadamente entre 100 m (330 ft) y 600 m (2 000 ft), capa ésta a la que se ha denominado desde entonces la capa de Ekman. Aplicada a la atmósfera, la ecuación de Ekman puede plantearse del modo siguiente:⁷

$$u = V_g - V_g \sqrt{2 \operatorname{sen} a e^{-Bz} \cos \left(Bz + \frac{\pi}{4} - a \right)}$$

y

$$v = V_g \sqrt{2 \operatorname{sen} a e^{-Bz} \sin \left(Bz + \frac{\pi}{4} - a \right)}$$

donde

- u y v = son las componentes horizontales del viento en la altura z ,
- V_g = es el viento geostrófico,
- a = es el ángulo entre el viento real al nivel del anemómetro y el viento geostrófico (véase 3.1.10),
- B = una constante que comprende los parámetros de viscosidad y de coriolis.

3.1.9 En toda la capa de Ekman, se logra un equilibrio entre la fuerza de fricción, la fuerza del gradiente horizontal de presión y la fuerza de coriolis. En la parte inferior de la capa es igual el orden de magnitud de las tres fuerzas y se consigue la corriente equilibrada debido a que el viento sopla a través de las isobaras, hacia la más baja presión. El ángulo de esta corriente a través de las isobaras disminuye exponencialmente con la altura a medida que decrece el efecto de fricción, hasta que se alcanza un nivel en que es insignificante el efecto de fricción, donde se consigue un equilibrio entre la fuerza del gradiente horizontal de presión y la fuerza de coriolis, y donde el viento sopla a lo largo de las isobaras.

3.1.10 El nivel al cual el viento sopla a lo largo de las isobaras se denomina nivel del viento geostrófico o, simplemente, cima de la capa de fricción. En este nivel y por encima del mismo, los vientos calculados con arreglo a la teoría de Ekman se aproximan mucho al viento geostrófico. Según esta teoría, el ángulo de la corriente transversal a las isobaras en la capa de Ekman alcanza un máximo de 45° en la superficie o apenas por encima de ella, y decrece exponencialmente por encima de una altura aproximada de 100 m (330 ft) hasta 0° en la cima de la capa de fricción. Si los vientos calculados en la capa de Ekman se representan por una hidrográfica, los extremos de los vectores viento describen una espiral equiangular, llamada espiral de Ekman (véase la Figura 3-2).

3.1.11 En la práctica, se observa que la velocidad del viento suele aumentar con la altura en la capa de Ekman, que el viento sopla a determinado ángulo a través de las isobaras, que este ángulo decrece con la altura y que el viento gira en el sentido de las agujas del reloj con la altura en el hemisferio norte y en el sentido contrario en el hemisferio sur. Sin embargo, la espiral ideal que se muestra en la Figura 3-2 raramente se consigue, y fuera de las regiones ecuatoriales donde la fuerza de coriolis es casi nula y el

viento puede soplar prácticamente desde cualquier ángulo respecto a las isobaras, el viento atraviesa las isobaras a un ángulo que raramente superior a 30° . Si se combina el perfil logarítmico del viento y el perfil de Ekman, se obtiene una representación adecuada de la cizalladura del viento “normal” (es decir, no sometida a la influencia de determinados fenómenos meteorológicos que la ocasionan) entre la superficie y una altura de unos 600 m (2 000 ft).

3.1.12 A raíz de la reciente labor intensiva para desarrollar sistemas integrados de observación del viento en los aeródromos, tales como el sistema meteorológico de terminal integrado (ITWS), que se describe en 5.1.31 y siguientes, y el sistema radar de perfil del viento, utilizado para el sistema de separación de estelas turbulentas de las aeronaves (AVOSS) de la Administración Federal de Aviación y la Administración Aeronáutica y Espacial (FAA/NASA) de los Estados Unidos, descrito en 3.8.3, se ha compilado un considerable volumen de datos sobre perfiles del viento en la capa de Ekman y la correspondiente cizalladura del viento. Con relativa frecuencia se han observado corrientes en chorro a baja altura, con velocidades de viento superiores a 400 km/h por 30 m (20 kt por 1 000 ft) y numerosos casos en que los vientos eran superiores a 40 km/h por 600 m (20 kt por 2 000 ft) en la zona Dallas/Fort Worth⁸ (Estados Unidos).

3.1.13 Estos perfiles del viento tienen un interés más que teórico en los aeródromos debido a que el control de tránsito aéreo (ATC) tiene un creciente interés en utilizar la información sobre la estructura detallada del viento hasta una altura de 600 m (2 000 ft) para aumentar la eficacia del aeródromo permitiendo que se acepte un mayor número de aeronaves. Los estudios⁹ indican que si se permite a unas pocas aeronaves adicionales aterrizar en cada hora en un aeropuerto con capacidad limitada, pueden obtenerse ventajas financieras considerables [\$17 millones, utilizando los datos sobre vientos en el área terminal en el Aeropuerto Dallas/Fort Worth y \$27 millones en el Aeropuerto internacional John F. Kennedy (JFK) de Nueva York]. Aunque no se ha observado fuerte cizalladura del viento (o sea, de perfil no convectivo), las cizalladuras de perfil superior exigen que los pilotos vigilen atentamente sus velocidades de aproximación a fin de evitar las aproximaciones frustradas que no sean necesarias, así como los correspondientes costos.

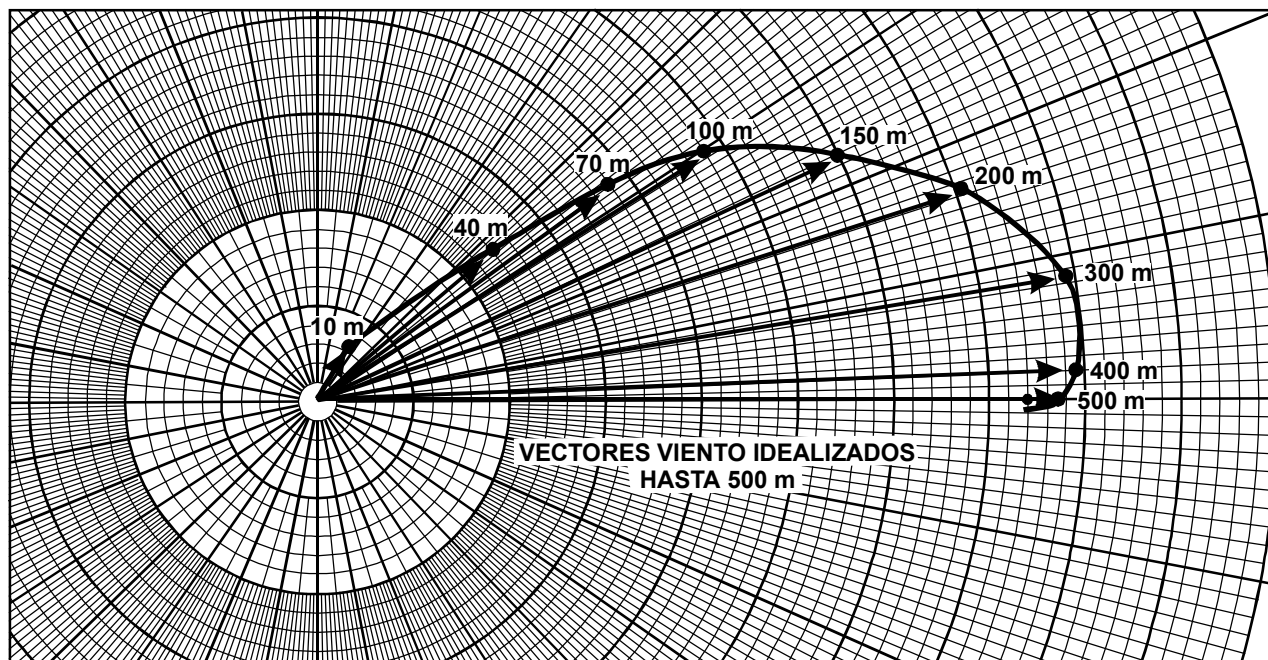


Figura 3-2. Espiral de Ekman

MODELOS DE PERFILES DEL VIENTO APLICABLES A LAS CONDICIONES DE ESTABILIDAD NO NEUTRA

3.1.14 Se han obtenido empíricamente otros modelos que representan los perfiles del viento atmosférico en condiciones de estabilidad no neutra.^{10,11,12} El más conocido es “ley de potencia” que enlaza mediante un parámetro de estabilidad las velocidades de los vientos que soplan en dos niveles de la atmósfera, como sigue:

$$u = u_1 \left[\frac{z}{z_1} \right]^\gamma$$

donde

$u, u_1 =$ son las velocidades del viento a las alturas z, z_1 , respectivamente,
 $\gamma =$ es un parámetro que depende de la estabilidad, de la aspereza de la superficie y de la altura, cuyo valor se determina empíricamente entre 0 y +1.

La ley de potencia se suele emplear en condiciones de viento adiabático, cuando sopla un viento fuerte en la capa comprendida entre 10 m y 200 m.

3.2 FLUJO DEL VIENTO EN TORNO A LOS OBSTÁCULOS

3.2.1 La combinación de fuertes vientos en la superficie y de obstáculos al viento dominante, situados contra el viento en la trayectoria de aproximación o de salida (tales como grandes edificios, colinas o ríngleras de altos árboles) pueden crear áreas localizadas de cizalladura del viento a poca altura. En estas circunstancias, la cizalladura del viento suele ir acompañada de turbulencia en aire claro (CAT). El efecto de los obstáculos en el viento dominante depende de varios factores, siendo los más importantes la velocidad del viento y su orientación respecto al obstáculo, así como la dimensión del obstáculo en relación con las dimensiones de la pista.

3.2.2 La cizalladura del viento de este tipo que suele encontrarse con más frecuencia, especialmente en los pequeños aeródromos, es la ocasionada por grandes edificios situados en la proximidad de una pista. Si bien la altura de los edificios está limitada en función de la distancia que los separa del borde de la franja de pista, con objeto de que no constituyan un obstáculo para las aeronaves, estos edificios suelen ser de dimensiones laterales bastante grandes y, por diversas razones, tienden a hallarse agrupados en una misma zona. Por consiguiente, aun cuando los edificios sean relativamente bajos (hangares y depósitos de combustible, etc.) oponen una barrera ancha y compacta al viento dominante en la superficie. La corriente del viento se desvía en torno a los edificios y por encima de éstos, lo que ocasiona variaciones del viento en la superficie a lo largo de la pista [véase la Figura 3-3 a)]. La cizalladura horizontal del viento, normalmente muy localizada, de escasa altura y turbulenta, afecta especialmente a las aeronaves ligeras que utilizan los pequeños aeródromos, pero también puede afectar a las grandes aeronaves.¹³

3.2.3 A veces, los campos de aviación se hallan verdaderamente embutidos en grandes bosques de coníferas y la pista se encuentra realmente en un “túnel” de árboles. Si la línea de árboles se encuentra distante de la franja de pista y no constituye un obstáculo para las aeronaves, como la altura del bosque o la bóveda de las plantaciones puede alcanzar 30 m (100 ft), es frecuente que no haya ninguna relación, o casi ninguna, entre el viento en la superficie que sopla a lo largo de la pista y el viento dominante que sopla por encima de la bóveda formada por el arbolado. Lo más frecuente es que el viento en la superficie sea suave y variable o que esté en calma, independientemente del viento dominante [véase la Figura 3-3 b)].

3.2.4 Tienen interés general las pistas que se han tenido que construir en valles estrechos o a lo largo de una cadena de colinas. En tal caso, el obstáculo es de tal magnitud que puede afectar al viento que sople a baja altura en una extensa zona. Si una cadena de colinas bajas se extiende a lo largo de una pista, su altura tal vez no sea suficiente para desviar el viento, pero el viento forzado a pasar por encima de estas colinas adquiere una componente vertical (descendente) que, según la proximidad de las colinas en relación con la pista, puede ocasionar localmente a lo largo de ésta corrientes descendentes a baja altura [véase la Figura 3-3 c)]. Si las colinas o montañas son lo suficientemente altas para desviar el viento a baja altura, el viento en la superficie puede encauzarse a lo largo de la pista [véase la Figura 3-3 d)]. En casos especiales en que las colinas se elevan a ambos costados de la pista, la corriente del viento encauzada puede experimentar un efecto Venturi^e que causa una aceleración del viento en la superficie.¹⁴

3.2.5 Puede también producirse un incremento en la cizalladura del viento si soplan fuertes vientos en la superficie en un aeródromo donde no existan obstáculos importantes a la corriente del viento porque en las capas de la atmósfera más cercanas al suelo, el viento fuerte incrementa la turbulencia mecánica. Esto produce, a su vez, una transferencia de cantidad de movimiento a través de la capa y reduce la cizalladura del viento en la proximidad del suelo, si bien ésta experimenta un incremento correspondiente en los niveles más elevados de la capa límite de superficie.

3.2.6 La cizalladura del viento descrita en 3.2.1 a 3.2.4 se debe a los efectos mecánicos de los obstáculos que se oponen al viento dominante. En determinadas circunstancias, además del efecto mecánico, las propiedades termodinámicas de la atmósfera pueden actuar sobre el viento en movimiento en torno a los obstáculos, creando de este modo condiciones especiales de cizalladura del viento..

3.2.7 El caso más corriente es el del viento catabático que sopla durante la noche por encima de terreno en pendiente, sin nubes, cuando existe un leve gradiente de presión especialmente anticiclónico. El viento se forma debido a la corriente gravitatoria hacia la parte inferior de la ladera, al aire más frío y más denso que está en contacto con la pendiente, debajo del aire más caliente y menos denso que se encuentra al mismo nivel, pero a alguna distancia de la superficie de la pendiente. Se producirá cizalladura del viento y turbulencia a baja altura a lo largo del borde anterior y en la cima del aire frío a medida que éste fluye hacia la parte inferior de la pendiente; su aparición puede ser a veces repentina, parecida a un débil frente de ráfagas (véase 3.5.8 a 3.5.10). El aire frío y denso se encuentra como un “pantano” en el fondo del valle, formando una inversión de la temperatura en la proximidad del suelo. Si esta inversión es lo suficientemente fuerte, los vientos dominantes por encima de la superficie pueden deslizarse por encima de este “pantano estancado” de aire frío acumulado en el fondo del valle, produciendo una cizalladura del viento a alguna altura por encima del nivel del suelo a lo largo de la parte superior de la inversión. Dicho efecto puede producirse a diferentes escalas, desde los denominados vientos de valle o de drenaje, en la escala más pequeña, hasta los vientos de los fiordos de Noruega, el Mistral del sur de Francia, el bora del Adriático y los fuertes vientos de escala continental que soplan desde Groenlandia y el Antártico.¹⁵ Para que se produzcan estos efectos a gran escala, es preciso que se agrupen otros factores al efecto catabático, tales como aire intensamente frío a gran altitud, orientación óptima de las isobaras y, por consiguiente, corriente del viento dominante y, en el caso del Mistral, el efecto Venturi del Valle del Ródano (Francia), que puede acelerar el viento frío del noroeste que sopla por las laderas hasta alcanzar velocidades de 140 km/h (70 kt) o más.

3.2.8 Se ha mencionado en 3.2.4 el caso simple de una corriente de viento en la superficie forzada a franquear una cadena de colinas poco elevadas en la proximidad de una pista. En una escala mayor, cuando la corriente de viento ha de franquear una cadena de montañas, puede formarse una serie de ondas estacionarias, según la velocidad y la estabilidad de la corriente de aire, en la ladera a sotavento de las montañas.¹⁶ Algunas cadenas montañosas presentan características singulares (especialmente laderas

e. Giovanni Venturi (1746–1822), físico italiano que contribuyó al estudio de la dinámica de los fluidos y elaboró el tubo que lleva su nombre.

abruptas) y condiciones meteorológicas favorables, como en el caso de las Montañas Rocosas en los Estados Unidos, en las que se producen acentuadas ondas a sotavento. Las condiciones meteorológicas más favorables para la formación de dichas ondas, son las siguientes:

- a) una capa de aire estable intercalada entre dos capas menos estables, una próxima al suelo y la otra a un nivel más elevado;
- b) un viento de más de 30 km/h (15 kt) que sopla dentro de los 30° a ambos lados de la línea perpendicular a la cresta;
- c) una cizalladura direccional del viento floja o nula en la capa estable; y
- d) una diferencia de presión a nivel del mar por encima de la barrera de montañas.

3.2.9 Si es suficiente la amplitud de las ondas que se desarrollan a sotavento, puede formarse una corriente cerrada de remolinos por debajo de una cresta de ondas. En condiciones extremas, esta corriente

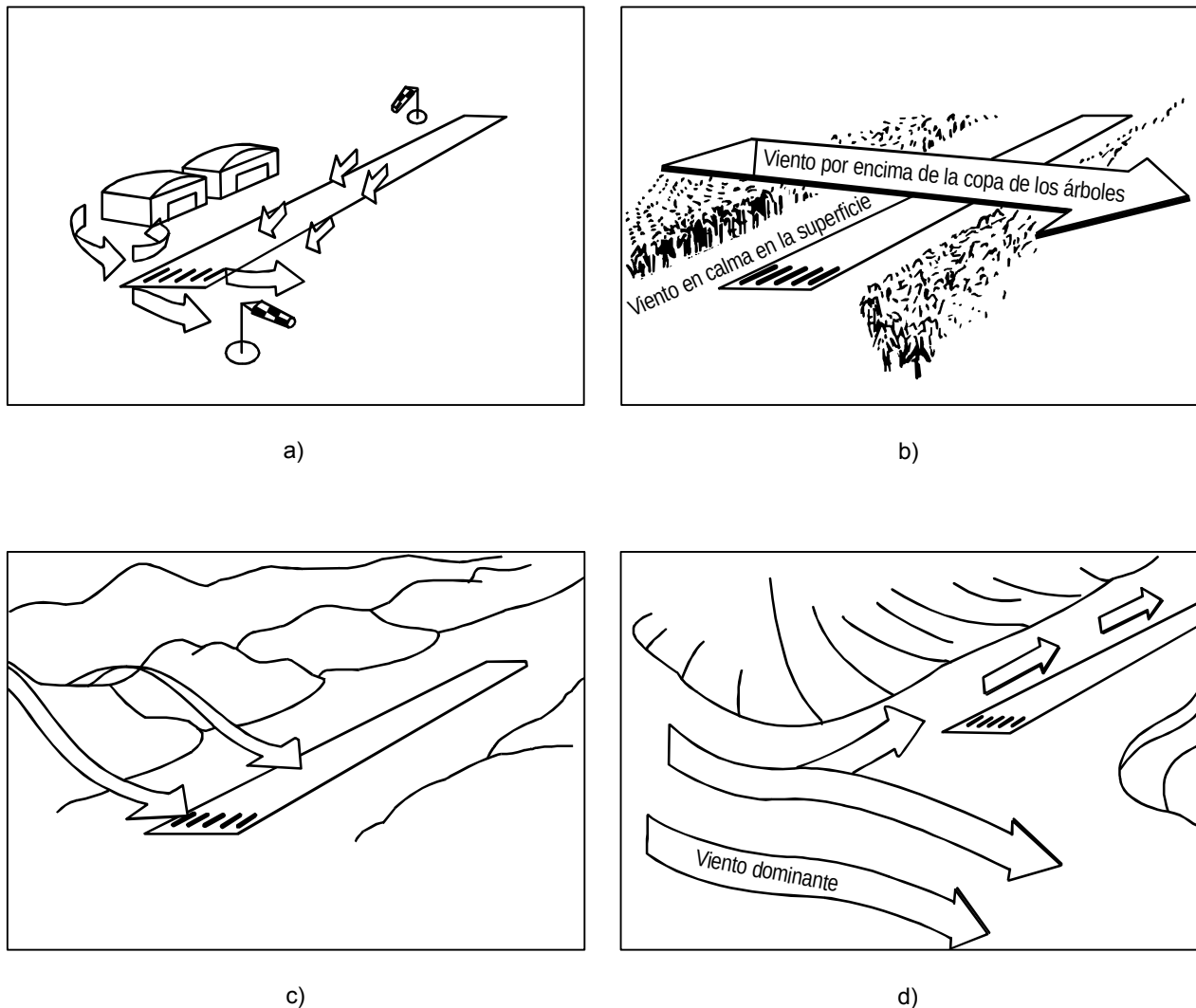


Figura 3-3. Flujo del viento en torno a los obstáculos

puede llegar a nivel del suelo e invertir el viento dominante en la superficie directamente por debajo de los remolinos (véase la Figura 3-4). En tales condiciones extremas, se han conocido casos en que las ráfagas en la superficie generadas por el remolino eran superiores a 200 km/h (100 kt), p. ej., durante los llamados “temporales de viento” cerca de Boulder (Colorado).¹⁷ Aún no se comprenden bien los factores necesarios para la aparición de estas condiciones extremas, pero se ha indicado que cierta resonancia natural y amplificación podría desempeñar un papel determinante. Cuando la corriente de aire es suficientemente húmeda, se forma una “nube de remolinos” muy turbulenta en la parte superior del remolino cerrado. Estos sistemas de ondas estacionarias producen corrientes descendentes acentuadas a lo largo de la cresta de la montaña y otras de menor magnitud a una distancia considerable de la ladera, en las ondas secundarias y terciarias de la serie que se forma en la ladera a sotavento de la montaña.

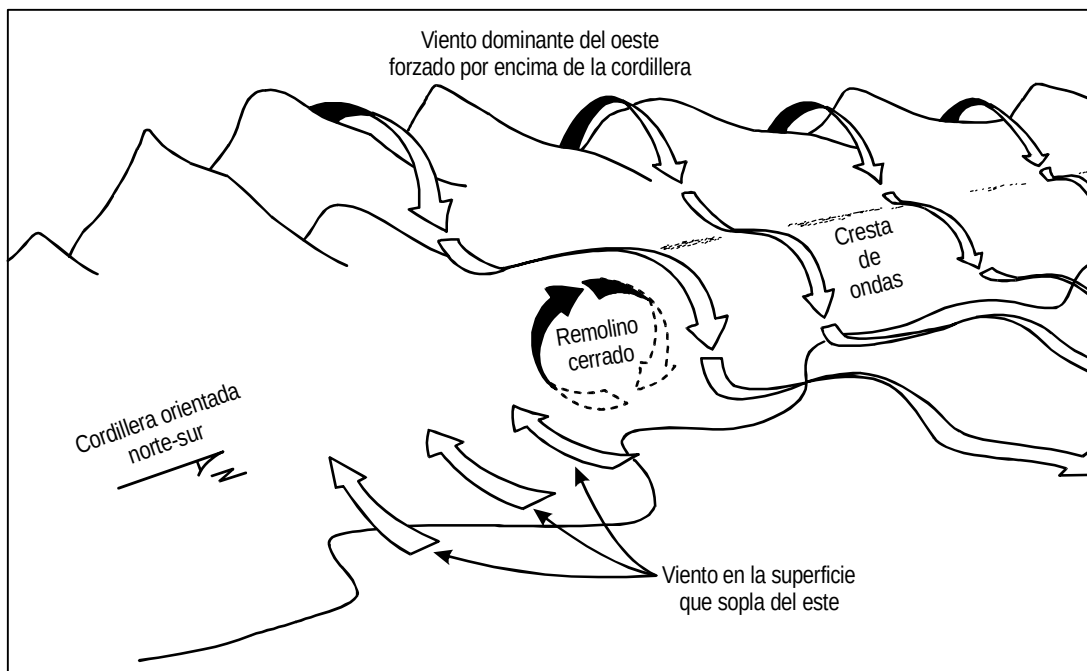


Figura 3-4. Ondas a sotavento

3.2.10 Otro efecto que puede producirse cuando el viento se ve forzado a pasar por encima de una cordillera es el “viento Foehn” (p. ej., el “Chinook” del oeste canadiense y el “Santa Ana” de California, Estados Unidos), que sopla hacia la parte inferior de las laderas a sotavento de las montañas. En la mayoría de los casos, una de las condiciones que han de concurrir para que se origine dicho viento es que la corriente de aire, forzada a pasar por encima de las montañas, sea lo suficientemente húmeda para que se formen nubes y precipitaciones a lo largo de las laderas a barlovento. En estas condiciones, el aire ascendente se enfría en el gradiente adiabático saturado y, siempre que el agua sea eliminada por las precipitaciones en las laderas a barlovento, el calentamiento adiabático que ocurre cuando el aire desciende por la ladera a sotavento de las montañas se produce en gran parte en el gradiente adiabático seco. Por consiguiente, cuando el aire llega al suelo es en forma de un viento seco, perceptiblemente caliente. El viento Foehn puede empezar a soplar de manera muy repentina, generando fuertes vientos rafagosos en los aeródromos situados a su paso. En caso de una fuerte inversión de temperatura en la proximidad del suelo, el Foehn se desliza por encima de la inversión, produciendo una cizalladura del viento

a lo largo de la zona de la inversión, a una altura comprendida entre 100 y 500 m (330 y 1 600 ft) por encima del nivel del suelo. También se ha observado que el viento Foehn puede empezar a soplar sin que se formen precipitaciones en la ladera de la cordillera. En estos casos se estima que el viento seco y caliente que desciende por la vertiente tiene su origen más arriba de la cordillera, debido posiblemente a la formación de una onda a sotavento estacionaria, según se describe en 3.2.8 y 3.2.9.

3.2.11 Existe otro tipo de ondas atmosféricas que se encuentran en algunas partes del mundo y no son ondas estacionarias, sino ondas que se propagan a manera de una onda de gravedad en los niveles inferiores de la atmósfera, especialmente al amanecer. Este tipo de ondas se observa más frecuentemente en el Golfo de Carpentaria, en el norte de Australia, donde este fenómeno se denomina “morning glory”,¹⁸ probablemente debido a las espectaculares nubes rollo o serie de nubes rollo que acompañan a la propagación de la onda. En la Figura 3-5¹⁹ se muestra un corte vertical de las líneas de corriente asociadas a una “morning glory” característica. Si bien las ráfagas registradas en los vientos en la superficie del paso de una “morning glory” no suelen ser superiores a 10 m/s (20 kt), su aparición es repentina, el viento cambia bruscamente de dirección (con frecuencia hasta 180°) y se producen fuertes corrientes descendentes dentro de la propia onda.²⁰ La propagación de la onda suele ser relativamente constante, por lo general a más de 10 m/s (20 kt) y al paso de la onda se produce un fuerte gancho barométrico de tormenta o de turbonada. No se comprende aún plenamente la causa de este tipo de onda, pero se piensa que la desencadena una perturbación, por ejemplo un frente de brisas de mar, un frente de ráfagas o un frente frío que se propaga a lo largo de una inversión nocturna y que actúa como guía de la onda por delante del propio frente. Este fenómeno puede, evidentemente, afectar a la actuación de la aeronave durante las operaciones de aterrizaje y de despegue. Aún queda por confirmar si tales fenómenos han contribuido a accidentes de aviación, pero algunos investigadores consideran que sí.²¹

3.3 CORRIENTES AÉREAS QUE ACOMPAÑAN A LAS SUPERFICIES FRONTALES

3.3.1 Las superficies frontales son zonas de transición que separan las masas de aire de diferentes temperaturas y, por consiguiente, de distintas densidades. Cuando dos masas de aire entran en contacto, se llega a un equilibrio de modo que el aire más frío y más denso permanece como una cuña por debajo del aire más caliente y menos denso, formando el límite entre los dos un ángulo poco pronunciado respecto a la horizontal. La inclinación de la superficie frontal se debe a la rotación terrestre, pero el grado de inclinación depende también del contraste existente en la distribución de la temperatura y el viento a lo largo del límite entre las dos masas de aire: cuanto mayor es este contraste más acentuada es la pendiente. La dinámica de las superficies frontales exige discontinuidad en la velocidad del viento a través de la superficie, especialmente en los niveles inferiores de la atmósfera; por consiguiente, la superficie frontal es, por su propia naturaleza, una zona de cizalladura del viento.

3.3.2 La intersección de la superficie frontal con el plano horizontal indica la posición de la superficie frontal a determinado nivel; a la línea de intersección con la superficie terrestre se le denomina frente de superficie o simplemente frente. Los frentes se clasifican según sus movimientos y los cambios de temperatura resultantes en el lugar por el que pasan; un frente frío (caliente) se define como un frente a lo largo del cual el aire frío (caliente) reemplaza al aire más caliente (más frío) en la superficie. Los frentes relativamente intensos presentan zonas de transición precisas y, por consiguiente, las apreciables discontinuidades de la velocidad del viento son las que con mayor probabilidad producen cizalladuras del viento que podrían afectar a las aeronaves.²² La pendiente media de un frente frío es del orden de 1/50 a 1/100, si bien la fricción con el suelo retarda el aire denso y frío próximo a la superficie, lo cual puede producir pendientes aún más pronunciadas en las capas inferiores de la atmósfera, incluso, en determinados casos, formar una “naríz” (un saliente) donde el aire frío que se encuentra justamente por encima de la superficie avanza por delante del aire frío que se encuentra al nivel del suelo. Los frentes calientes son menos profundos, con pendientes características del orden de 1/100 a 1/300, o incluso menos

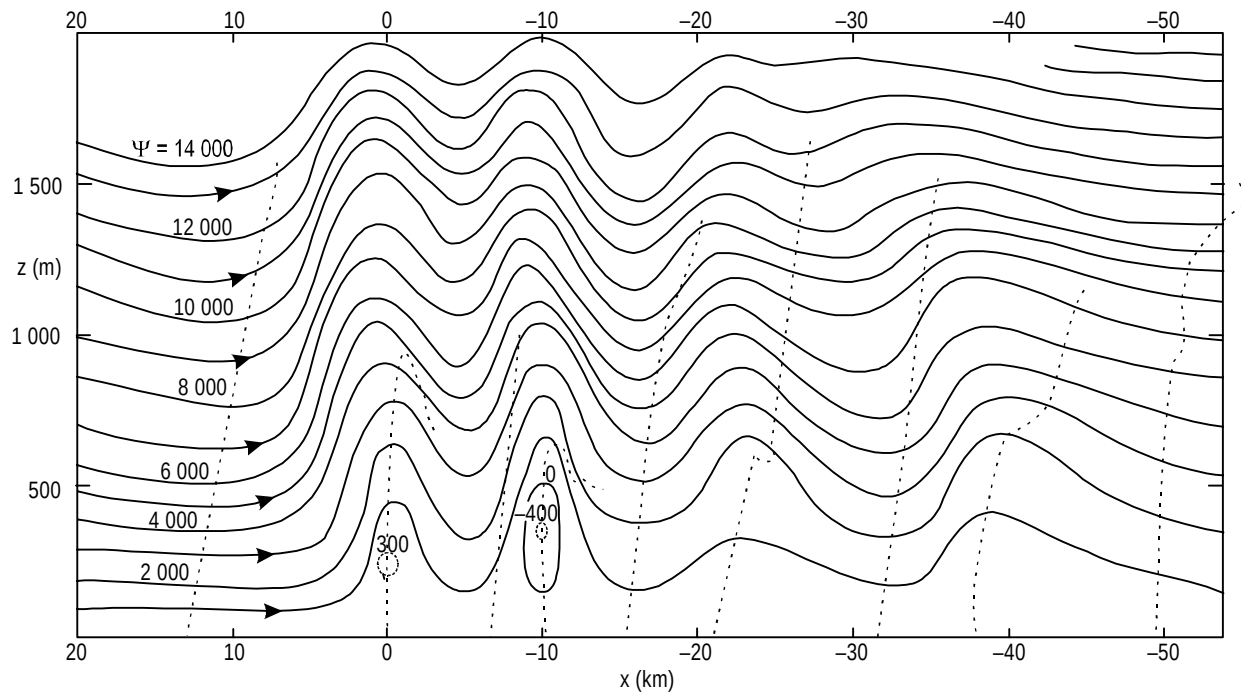


Figura 3-5. Corte vertical de las líneas de corriente normales a la línea de nubes en la “morning glory”, del 4 de octubre de 1979, con arreglo a los datos anemométricos obtenidos mediante un teodolito doble (según Smith y Goodfield, 1981, y adaptación por la OACI)

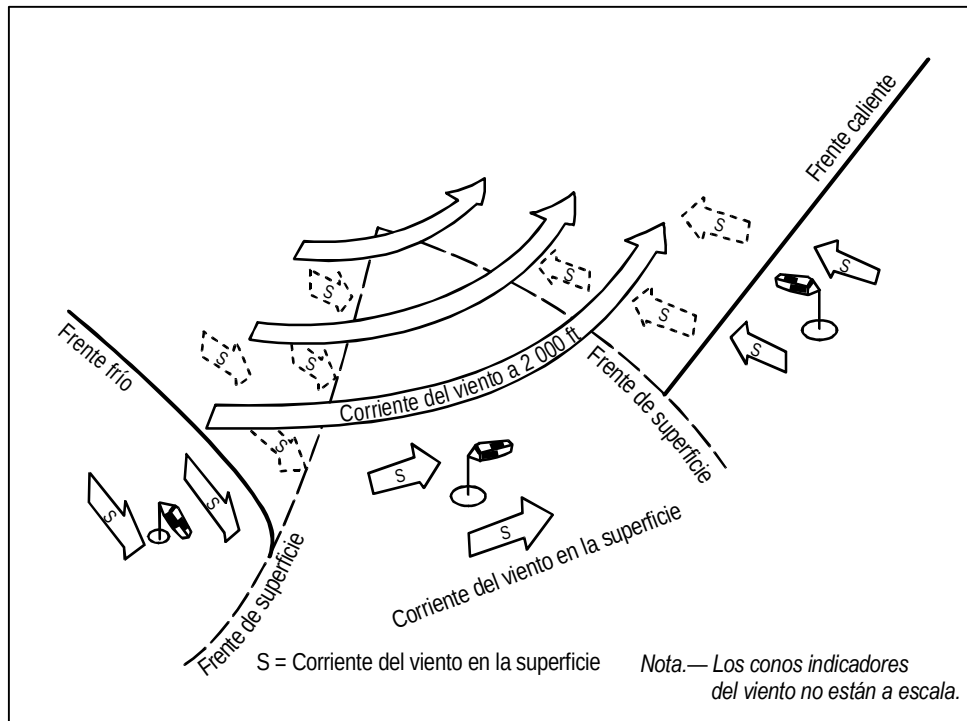
pronunciadas, hasta el nivel del suelo. Con arreglo a las pendientes características mencionadas anteriormente se ve que, salvo en los casos de frentes fríos muy intensos en la proximidad del suelo, la pendiente de los frentes incluso en los más acentuados tiende a ser menos pronunciada que la pendiente de planeo usual de 3° ($\sim 1/20$) y mucho menos pronunciada que la trayectoria de ascenso habitual.

3.3.3 De lo expuesto resulta que el frente caliente se inclina hacia delante en dirección del movimiento del frente, mientras que el frente frío se inclina hacia atrás en el sentido opuesto (véase la Figura 3-6). Las consecuencias para un aeródromo por encima del cual pasan los frentes es que la cizalladura vertical del viento a través de la superficie frontal ocurre:

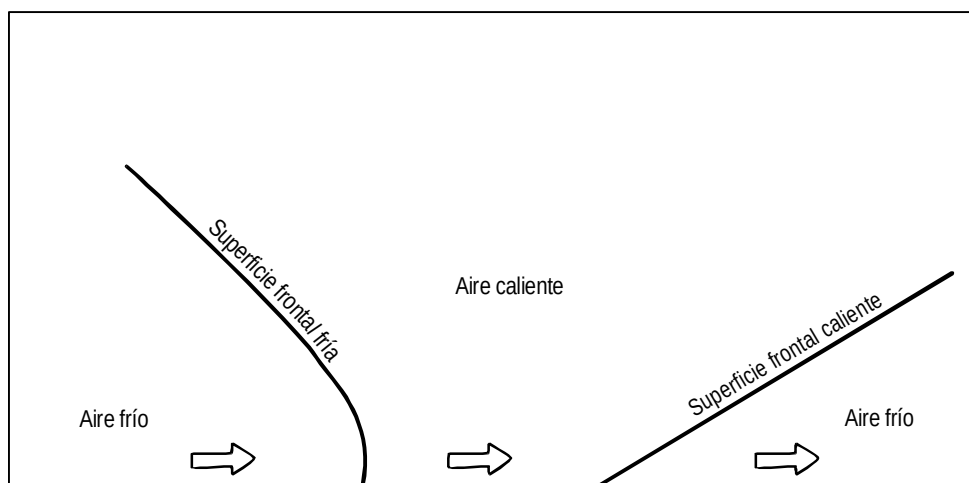
- encima del aeródromo situado más adelante del frente caliente, descendiendo el nivel de la cizalladura del viento máxima hasta el nivel del suelo a medida que se aproxima el frente caliente; y
- en el sitio del frente frío y por detrás de éste, elevándose el nivel de la cizalladura del viento máxima por encima del aeródromo desde el nivel del suelo después del paso del frente frío.

3.3.4 Al nivel del suelo ocurre también cizalladura horizontal del viento a través del frente, pero es probable que sea de corta duración dada la velocidad con que suelen pasar los frentes por encima de un aeródromo. La cizalladura más importante desde el punto de vista de la aviación es la vertical a través de la superficie frontal por encima de un aeródromo, por delante de un frente caliente que se aproxima o por detrás de un frente frío que se aleja. Como los frentes calientes suelen desplazarse más lentamente que los fríos, las condiciones de cizalladura del viento que existan delante de un frente caliente en la superficie pueden afectar a un aeródromo durante más tiempo que las condiciones que sigan a un frente frío.

La cizalladura del viento que se examina aquí se relaciona con la propia superficie frontal, sin tener en cuenta las cizalladuras producidas por las tormentas, etc., que pueden formarse a lo largo del frente. El efecto de la cizalladura vertical frontal en una aeronave depende de la anchura de la superficie frontal (zona de transición) y del tiempo de tránsito de la aeronave en vuelo a través de la zona, lo cual, a su vez, depende de las pendientes relativas de la trayectoria de vuelo y de la superficie frontal, así como de la velocidad de la aeronave respecto al suelo.



a) Esquema tridimensional de la corriente del viento en torno a un sistema frontal caliente/frío, hasta 2 000 ft, hemisferio norte (escala vertical exagerada)



b) Vista en corte vertical de un sistema frontal caliente/frío (escala vertical exagerada)

Figura 3-6. Superficies frontales

3.4 BRISA DE TIERRA Y BRISA DE MAR

3.4.1 Por encima de las áreas terrestres adyacentes a grandes extensiones de agua, tales como el mar o grandes lagos tierra adentro, se produce una variación diurna bastante perceptible del viento en la superficie. Este efecto se debe al gradiente de temperatura que se forma durante el día entre el aire sobre la superficie terrestre calentada y el aire del litoral enfriado por el agua; esto es especialmente perceptible cuando el viento dominante en los niveles inferiores es ligero y los días son soleados y las noches claras. El viento en la superficie sopla desde el agua hacia tierra durante el día en forma de una brisa de mar o del agua; con frecuencia empieza a soplar bastante bruscamente por la mañana y se invierte al llegar la noche, para convertirse en una brisa de tierra o del litoral que sopla desde la tierra hacia el mar (véase la Figura 3-7). Además del brusco cambio del viento en la superficie, la aparición de la brisa de mar se pone a menudo de manifiesto con un descenso de la temperatura y un aumento de la humedad. Inicialmente la brisa de mar sopla aproximadamente a ángulo recto con la costa a velocidades de 20 a 30 km/h (10 a 15 kt), si bien puede superar los 40 km/h (20 kt) en zonas tropicales. La brisa de mar es mucho más fuerte que la brisa de tierra y puede penetrar a mediados de la tarde hasta una distancia de 48 km (30 NM) tierra adentro y alcanzar una altura de unos 360 m (1 200 ft) por encima del nivel del suelo (AGL). La brisa de mar deja de soplar al atardecer, cuando el enfriamiento por radiación por encima de la superficie terrestre reduce el gradiente de temperatura, y puede ser reemplazada antes del amanecer por una ligera brisa de tierra de escasa altura.

3.4.2 La brisa de mar es esencialmente un frente de poca altura debido a que el aire frío reemplaza al aire caliente; sin embargo, la pendiente y el gradiente de temperatura se parecen más a los de un frente caliente que los de un frente frío.²³ La cizalladura del viento en la brisa de mar se produce predominantemente en la superficie a lo largo del borde anterior a medida que el frente penetra tierra adentro, si bien existe cizalladura del viento de menor magnitud en niveles superiores. La importancia del efecto de la brisa de mar en determinado lugar dependerá mucho de la topografía circundante y, por consiguiente, dicho efecto puede tener carácter muy local. Cuando es fuerte la brisa de mar y penetra a alguna distancia tierra adentro, empieza a acusarse el efecto de la fuerza de coriolis y el viento termina por formar una componente paralela a la línea de la costa. En el momento de desarrollo máximo de la brisa de mar, al atardecer, el frente puede distinguirse por una línea de convergencia y por una vigorosa convección que, en circunstancias favorables, puede originar líneas de chubascos o incluso tormentas. La brisa de tierra o de mar puede producir diversos efectos sutiles según sea la topografía local, por ejemplo, la formación de líneas de convergencia y de tormentas que la acompañan tierra adentro en una península, o el efecto de intensificación que ejerce una línea de costa “cóncava” en la convergencia producida mar adentro por la brisa de tierra.

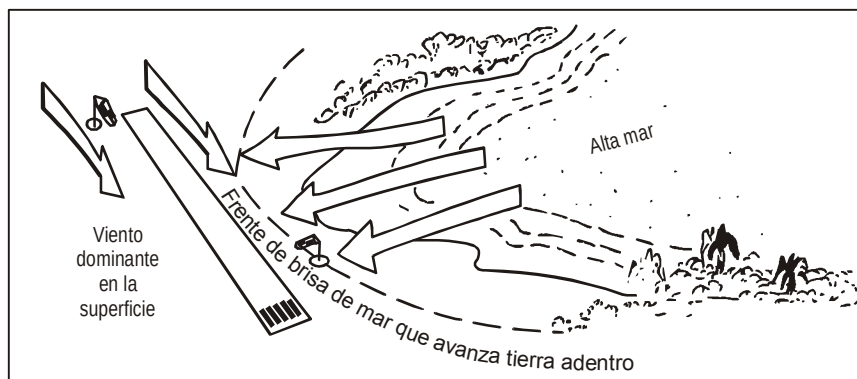


Figura 3-7. Frente de brisa de mar

3.5 TORMENTAS

GENERALIDADES

3.5.1 Las tormentas son sin duda la manifestación cotidiana más impresionante de las fuerzas de la naturaleza, de las que pueden ser testigo la mayoría de las personas en todo el mundo. El término tormenta es un término genérico que puede abarcar numerosos fenómenos producidos por nubes cumulonimbus en estado de madurez, tales como truenos y relámpagos, lluvias torrenciales, granizo, vientos violentos y tornados. La mayoría de estos fenómenos constituyen un peligro mayor para las aeronaves. La enorme energía que se desprende durante el desarrollo de una violenta tormenta puede ser del mismo orden de magnitud que una explosión atómica.

3.5.2 Los cumulonimbus, masa de nubes que se forman como una torre en las corrientes de aire ascendente, constituyen una forma especialmente violenta y espectacular de convección atmosférica. Cuando, por una u otra razón, la atmósfera se hace inestable, queda sometida a un movimiento convectivo. Un ejemplo corriente es el de las térmicas resultantes del calentamiento de las laderas orientadas hacia el sol. En condiciones favorables, la convección produce áreas de corrientes ascendentes localizadas lo suficientemente fuertes para que se formen cumulonimbus y tormentas. Las tormentas suelen clasificarse en dos tipos principales, según la fuente de inestabilidad, como sigue:

- a) tormentas de masas de aire o de calor; y
- b) tormentas frontales.

Las tormentas de masas de aire o de calor tienen una variación diurna pronunciada y se producen más frecuentemente por la tarde o al atardecer sobre la superficie terrestre debido a calentamiento solar. Se producen también de manera más o menos errátil por encima de un área donde la masa de aire es homogénea y donde las condiciones son uniformemente favorables. Sin embargo, aun cuando la norma es que su formación sea errátil, no se necesita gran cosa para que se produzca una manifestación organizada de este fenómeno dentro de la masa de aire homogénea. Esta organización puede ser causada por un levantamiento orográfico a lo largo de una cadena de montañas o por un levantamiento a lo largo de una línea de vientos convergentes que soplen a baja altura como, por ejemplo, a lo largo de la zona de convergencia intertropical o en las bandas de convergencia en espiral relacionadas con los ciclones tropicales. Las tormentas frontales suelen producirse unidas a frentes fríos y depresiones frontales donde la convergencia en las bajas capas y el paso del aire frío por debajo del aire caliente proporcionan el levantamiento necesario, como se ha descrito en 3.3.1. También pueden formarse tormentas a causa de una convergencia a baja altura a lo largo de frentes de brisa de mar durante la tarde por encima de la superficie terrestre o a lo largo de un frente de brisa de tierra que retrocede por encima del mar o de grandes lagos interiores antes del amanecer.

3.5.3 Las tormentas se suelen formar por un conglomerado de varias células, cada una de las cuales se comporta como una unidad de circulación convectiva, incluidas a la vez corrientes ascendentes y descendentes. Cada célula pasa por su propio ciclo de vida en un período que varía entre 30 minutos y una hora. Este ciclo de vida puede dividirse naturalmente en tres fases, según la dirección y magnitud de la corriente del aire vertical que predomine en la célula (véase la Figura 3-8), como sigue:

- a) fase de cúmulos, caracterizada por corrientes ascendentes en toda la célula;
- b) fase de madurez, caracterizada por la presencia simultánea de corrientes ascendentes y descendentes; y
- c) fase de disipación, caracterizada por flojas corrientes descendentes en toda la célula.

La formación de células dentro de una tormenta puede producirse a distintos ritmos, pudiendo no acabar algunas de las células su ciclo de vida, mientras que otras pueden desarrollarse más rápidamente a sus expensas. En los casos en que dos células se desarrollen en la proximidad inmediata una de la otra y en que una de las dos sea más fuerte, a menudo estas células se fusionan.²⁴

3.5.4 La estructura de las corrientes de aire dentro y en torno a las tormentas ha sido conocida de forma general desde los años 1940, especialmente gracias al importante proyecto de investigación denominado “Thunderstorm Project” emprendido en los Estados Unidos en 1946–47²⁵; las investigaciones más recientes lo han confirmado. En los últimos diez años, el empleo de radares Doppler múltiples para vigilar las corrientes de aire en aire claro y en las nubes, así como la simulación por computadora²⁶ de la dinámica de las tormentas ha permitido a los investigadores analizar con suma precisión la estructura de las corrientes de aire (véanse 5.1.17 a 5.1.42 y la Figura 3-9, respectivamente). Como cabía esperar, los resultados muestran que las tormentas constituyen un mecanismo termodinámico complejo si bien elegante y eficaz. La estructura detallada de una célula tormentosa está formada por un conjunto de corrientes ascendentes y descendentes bien organizadas que se entrelazan e interactúan para aprovechar lo más eficazmente el exceso de energía producido por los excedentes locales de calor y de humedad. El hecho de que la corriente de aire dentro y en torno a las tormentas en fase de madurez se concentre en tan potentes corrientes aéreas es de suma importancia para la aviación.

3.5.5 La estructura celular de las tormentas y su grado de organización celular se ha revelado como una característica frecuentemente identificable en el radar (especialmente en el radar Doppler) y se relaciona de manera bastante sistemática con la violencia de la tormenta.²⁷ En general, cuanto más organizada sea la estructura celular, más violenta es la tormenta. Esta característica constituye la base de una clasificación de las tormentas más detallada de lo que hasta ahora ha sido posible, como se indica en la Tabla 3-1. El grado de organización de las células de una tormenta, que a su vez guarda relación con la intensidad de la tormenta, depende en definitiva de varios factores meteorológicos interdependientes, incluida la estabilidad de la atmósfera, la convergencia y la divergencia de las corrientes de aire a distintos niveles de la atmósfera y el perfil del viento con la altura. Las recientes investigaciones indican que los más

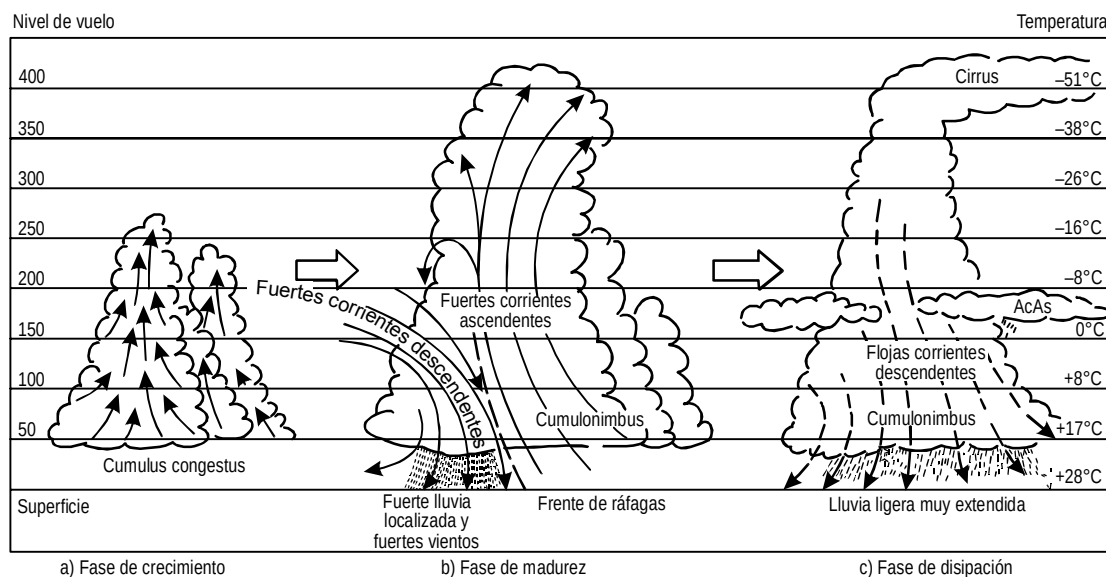


Figura 3-8. Ciclo de vida de una tormenta

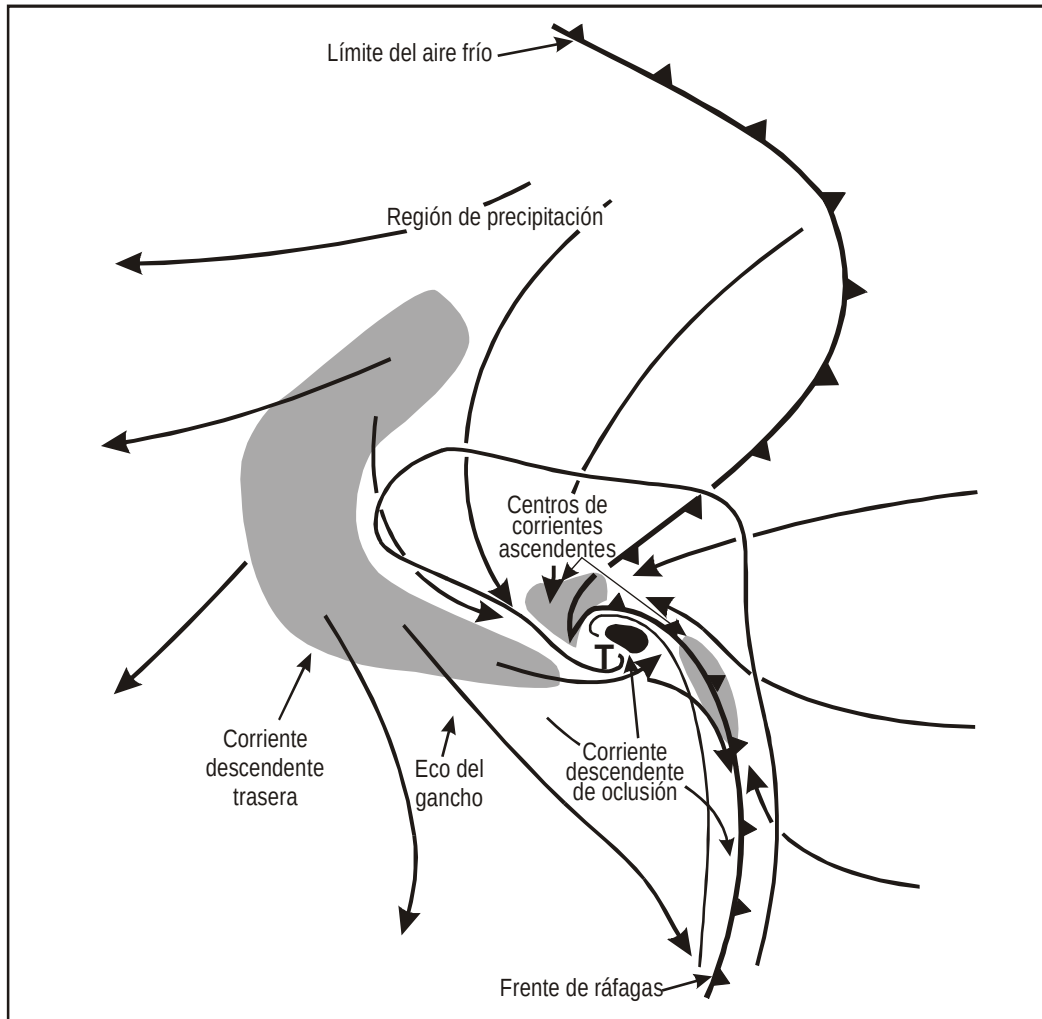


Figura 3-9. Modelo de tormenta con tornado;
(T) indica el emplazamiento del tornado
 (según Weisman, 1983)

críticos factores para determinar la intensidad de la tormenta²⁸ tal vez sean el perfil del viento (es decir, la cizalladura del viento en el plano vertical) y la inestabilidad. Si hay suficiente inestabilidad, convergencia a baja altura y humedad en la atmósfera, la intensidad de una tormenta tiende a aumentar en la medida en que la fuerza del viento aumente y en que éste gire en el sentido de las agujas del reloj (hemisferio norte) con la altura. Con el incremento de la cizalladura vertical del viento, el tipo de tormenta tiene tendencia a cambiar, variando desde células únicas efímeras poco organizadas, hasta células múltiples organizadas y hasta las denominadas “tormentas de supercélulas (unicelulares)”. Sin embargo, existe un límite superior natural y, en la presencia de valores sumamente elevados de cizalladura vertical del viento, la célula tormentosa puede resultar tan intensamente cizallada que finalmente se interrumpe la organización celular. Existe aparentemente una combinación óptima de inestabilidad y de cizalladura vertical especialmente favorable para la formación de tormentas de supercélulas.^{29,30,31} Como se indica en la Tabla 3-1, estas tormentas pueden causar enormes daños, no sólo directamente, en forma de granizo que afecte a una extensa zona, sino también indirectamente, debido a las fuertes ráfagas descendentes y los tornados que causan (véanse 3.5.23 a 3.5.27).

3.5.6 Las áreas localizadas de corrientes ascendentes, de las cuales depende el nacimiento de una tormenta, son engendradas y mantenidas por una o varias causas: calentamiento de la superficie, convergencia de corrientes de aire a baja altura, elevación frontal u orográfica, etc. La altura a la cual llegan las corrientes ascendentes y la formación de nubes depende principalmente de la estabilidad, de la humedad y del perfil del viento de la atmósfera. En una célula tormentosa en desarrollo, a medida que las corrientes ascendentes se elevan por encima de la base de las nubes, las gotas de agua de las nubes crecen rápidamente por coalescencia y condensación y empiezan a congelarse hasta que finalmente llegan a ser tan pesadas que vuelven a caer a través de la corriente ascendente y se vuelven aún más pesadas al llevarse las gotas de agua ascendentes. Este es el origen de las corrientes descendentes que, en esta fase, se aceleran por el efecto de la gravedad. No obstante, cuando la corriente descendente llega a niveles inferiores, el aire más seco procedente del exterior de las nubes, especialmente de los alrededores del nivel de congelación, queda sometido al efecto de arrastre, lo que ocasiona la evaporación de las gotas de agua descendentes y enfría rápidamente el aire circundante y acelera aún más la corriente descendente.³²

3.5.7 Las gotas de agua de la corriente descendente que no se evaporan completamente caen de la base de la nube cumulonimbus en forma de intensas lluvias localizadas, acompañadas de fuertes vientos rafagosos procedentes de la corriente descendente de aire frío. Las corrientes descendentes lo suficientemente fuertes para introducirse por debajo de la base de la nube se extienden horizontalmente en todas direcciones poco antes de llegar al suelo en forma de corriente fría cuyo borde anterior se parece a un frente frío de poca profundidad, al que se suele denominar “frente de ráfagas”. Las corrientes descendentes que llegan al suelo no van siempre acompañadas forzosamente de intensa lluvia, pero suelen estarlo. Incluso cuando las gotas de agua descendentes se evaporan completamente dentro de la nube o en el aire justamente por debajo de la base de la nube en forma de “virga”, la corriente descendente que las acompaña puede todavía penetrar por debajo de la base de nubes y llegar al nivel del suelo. Las corrientes ascendentes y descendentes, y especialmente las relacionadas con las tormentas fuertes, tienen una inmensa importancia en la esfera de la aviación y se examinan minuciosamente en la parte restante del presente capítulo.

EL FRENTE DE RÁFAGAS

3.5.8 Aun cuando los meteorólogos y los pilotos conocen desde hace tiempo los efectos generales del frente de ráfagas, y el propio término ha sido empleado por lo menos desde el comienzo de los años 1960, hasta hace relativamente poco no se ha adquirido un conocimiento cabal de su estructura.³³ El frente de ráfagas es el borde anterior del aire denso y frío de una corriente descendente tormentosa que llega al suelo y se extiende en todas direcciones, introduciéndose por debajo del aire más caliente y menos denso (véase la Figura 3-10). A este respecto, se parece a un frente frío de escasa profundidad, salvo que en el frente de ráfagas las velocidades del viento, la cizalladura del viento y la turbulencia resultantes son por lo general mucho más fuertes. Inicialmente, el frente de ráfagas avanza al nivel del suelo por igual en todas direcciones, pero si la propia célula tormentosa se mueve, como suele ser el caso, el frente de ráfagas avanza más lejos y más rápido por delante de la tormenta, en la dirección del movimiento de ésta (véase la Figura 3-11). Este efecto puede acentuarse si la corriente fría descendente llega hasta el suelo oblicuamente en vez de verticalmente como ocurre a menudo, lo cual propicia determinada dirección para el avance de la corriente fría hacia el exterior. Se produce una fuerte cizalladura del viento horizontal a nivel del suelo después del paso del borde anterior del frente y, como éste puede adelantarse hasta 20 km (12 NM) a la célula tormentosa que lo ha originado, este cambio repentino del viento en la superficie puede coger inesperadamente por sorpresa a los pilotos. El cambio de dirección del viento en la superficie suele ser con frecuencia de hasta 180° y la velocidad de los vientos rafagosos después del paso del frente puede ser superior a 100 km/h (50 kt).

3.5.9 Las tormentas se forman frecuentemente en líneas organizadas, especialmente en los trópicos; los frentes de ráfagas que forman estas líneas de turbonada tienden a tener mayor longevidad y a alejarse

mucho más rápidamente y más lejos de las tormentas que los engendraron [hasta 35 km (22 NM)] que los que generan las tormentas aisladas. Las líneas de turbonada sumamente organizadas son una característica de la estación de las lluvias en toda África occidental.³⁴ La profundidad del aire frío en el frente de ráfagas puede alcanzar hasta 1 000 m (3 300 ft), y se puede producir una cizalladura vertical del viento a lo largo de la superficie de discontinuidad entre el aire frío y el aire caliente. Al igual que en el caso de un frente frío, la fricción tiende a demorar el aire frío más próximo al suelo, permitiendo de este modo que el aire frío, que se encuentra a unos 200 m (600 ft) AGL, avance rápidamente y forme así una “naríz” dentro de la cual se desarrollan circulaciones o vórtices en los cuales, y en su estela, son especialmente intensas la cizalladura del viento y la turbulencia. Una célula puede producir una serie de corrientes descendentes y de saltos de aire frío, cada uno de los cuales forma una “naríz” en la estela de su predecesor.

3.5.10 Aun cuando normalmente los frentes de ráfagas se forman y circulan en aire claro sin que haya nada visible que señale su desarrollo y su paso, algunas veces ocurre que el aire caliente preponderante, si es lo suficientemente húmedo, produce una línea de nubes rollo lisas y brillantes por encima de la “naríz” del frente de ráfagas que, rodeando la base de la tormenta y avanzando por delante del cinturón de lluvia, ofrecen siempre un aspecto turbulento y amenazador. En algunas regiones, las corrientes descendentes, y especialmente los vórtices dentro de la naríz del frente de ráfagas, ocasionan nubes de polvo o de arena que se transforman en espectaculares cortinas móviles de arena. Son ejemplos los bien conocidos “Haboobs” del Sudán y los “Andhi” del noroeste de la India.³⁵ Se han observado con el radar meteorológico instalado en tierra frentes de ráfagas en forma de líneas o arcos tenues pero definidos (llamados a veces “ángeles” - parásitos) y se han observado líneas de turbonada en imágenes transmitidas por satélite. Los frentes de ráfagas se detectan mejor mediante el radar Doppler, aunque para que este método sea eficaz han de emplearse técnicas de detección automática.

LA RÁFAGA DESCENDENTE

3.5.11 La explicación dada en 3.5.6 y 3.5.7 respecto a la formación de fuertes corrientes descendentes en las células tormentosas que han alcanzado la fase de madurez, tenía debidamente en cuenta la mayoría de los fenómenos de corrientes descendentes y de frentes de ráfagas que se observan, pero quedan por lo menos dos fenómenos cuya explicación no es enteramente satisfactoria. El primero es que a veces se producen en una tormenta lluvias muy fuertes y localizadas que no van, o casi no van, acompañadas de corrientes descendentes que lleguen hasta el suelo, ni de vientos rafagosos fuertes en la superficie. El segundo es mucho más importante, porque se sitúa en el otro extremo, en el sentido de que después de la observación de los daños sufridos por los árboles, a veces se llega a la conclusión de que las velocidades del viento en las corrientes descendentes habían alcanzado valores sumamente elevados, sin que la intensidad de las lluvias que las acompañaban pareciese haber sido más elevada que en las corrientes descendentes habituales.

3.5.12 En 1947 Faust había procedido al estudio detallado de los daños causados a los árboles durante una tormenta, que mostrase las direcciones en que los árboles, el maíz, el trigo, etc., habían sido derribados por el viento. De estos estudios pudo deducir las características y la intensidad de los vientos de que se trataba. Fue también este método que empleó Fujita que, respecto a una serie especialmente violenta de tornados en 1974, observó que, a cierta distancia de las trayectorias de los tornados, los árboles de los bosques habían sido derribados en direcciones radiales, como si el soplo los hubiese proyectado hacia fuera. Se supuso que estos árboles habían sido derribados o abatidos por vientos violentos que soplaban hacia fuera desde el centro de la ráfaga (véase la Figura 3-12).³⁶ Byers y Fujita (1976) clasificaron tales corrientes descendentes como “ráfagas descendentes”, que definieron como “una corriente descendente localizada de gran intensidad, en la cual las corrientes verticales descendentes alcanzan una velocidad superior a 3,6 m/s o 720 ft/min a 90 m (300 ft) por encima de la superficie”.³⁶ En 1978, Fujita había generalizado la definición como “fuerte corriente descendente que ocasiona una ráfaga que sopla

hacia fuera con vientos destructores en el suelo o en su proximidad”. De la magnitud de los daños ocasionados a los árboles debido a tales ráfagas descendentes, resultó evidente que los vientos muy violentos podían llegar hasta el nivel del suelo y que el área afectada era relativamente pequeña, y ciertamente lo bastante pequeña para que pudiera pasar totalmente inadvertida de los sistemas de observación normalmente utilizados en las operaciones.

3.5.13 Se han ofrecido varias explicaciones de las apreciables diferencias (p. ej., velocidades de las corrientes descendentes y de las que soplan hacia el exterior) entre la usual corriente descendente engendrada por una tormenta, que se describe en 3.5.6 y 3.5.7 y la ráfaga descendente enunciada como hipótesis por Fujita^f y que posteriormente definió de manera concluyente. Se considera, por un lado, que la ráfaga descendente es una “super ráfaga descendente” que tiene su origen a muy altos niveles en la tormenta, mientras que, por el otro, se ha indicado que se produce en los niveles intermedios de la

Tabla 3-1. Clasificación de las tormentas

	<i>Tipo de tormentas</i>			
	<i>Masa de aire</i>		<i>Frontales</i>	
Estructura celular	Multicelular poco organizada	Multicelular organizada	Multicelular organizada	Unicelular muy organizada
Intensidad	Moderada	De moderada a muy fuerte	Fuerte	De fuerte a muy fuerte
Fenómenos causantes de daños que probablemente acompañen a las tormentas y que pueden afectar especialmente a las aeronaves que aterrizan o despegan	Fuertes vientos rafagosos locales, posibles ráfagas descendentes, pero poco frecuentes	Frente de ráfagas, ráfagas descendentes, trombas marinas sobre extensas superficies de agua, granizo local	Frente de ráfagas, ráfagas descendentes, microrráfagas, trombas marinas sobre extensas superficies de agua, granizo, tornados	Frente de ráfagas, ráfagas descendentes y microrráfagas, familias de tornados, granizo en extensas zonas
Ejemplos	Formación errátil de masas de aire, lo más frecuentemente sobre áreas marítimas/ oceánicas o formación localizada cerca de montañas, etc.	Frecuentemente organizadas en líneas especialmente en los trópicos (líneas de turbonada). Líneas en ciclones tropicales	Principalmente extratropicales frontales. Pueden organizarse en líneas o en grupos mesoescales	Principalmente frontales en zonas continentales en las latitudes medias. Llamadas “supercélulas tormentosas”
Movimiento	Generalmente con la corriente media. Pueden ser principalmente estacionarias cuando se forman cerca de montañas	Con la corriente media, pero la formación sucesiva de células puede ocurrir en un costado propicio que dé la impresión de movimiento en esa dirección	Con movimiento frontal, formación de nuevas células al nivel de frente de ráfagas especialmente entre células existentes	Más frecuentemente a la derecha de la corriente media (a veces se divide en dos tormentas). Estacionarias en casos raros, con daños locales catastróficos

f. En su libro “The Downburst”, Fujita hace un análisis completo de los conocimientos que se tenían en 1985 sobre la ráfaga descendente (véase la sección de bibliografía).

atmósfera. La última explicación parece concordar con los resultados obtenidos por observación y simulación de las “supercélulas tormentosas” (véase 3.5.28). Wolfson³⁷ hace un interesante examen comparativo de las diversas aclaraciones que se han ofrecido y llega a la conclusión de que, si bien todas son plausibles, hasta ahora no ha quedado demostrado que alguno de los mecanismos propuestos sea la causa real de las ráfagas descendentes.

3.5.14 Después del accidente ocurrido en 1975 en el Aeropuerto internacional JFK de Nueva York a un B727 de la Eastern Airlines, que efectuaba el vuelo 66, se prestó mayor atención a los peligros inherentes a las ráfagas descendentes, especialmente en relación con la aviación. El Dr. Fujita preparó un análisis detallado de las tormentas que se desencadenaron por encima del aeropuerto en ese momento, en el cual exponía la existencia de una serie de ráfagas descendentes para explicar la sucesión de acontecimientos en aquel aciago día. Llegaba a la conclusión de que “los resultados de las investigaciones y las deducciones referentes a los fenómenos que se examinan en esta nota hacen pensar que en determinadas tormentas existen células del tipo de ráfagas descendentes. Estas células es probable que se caractericen por ecos (radar) en punta de lanza, definición recientemente introducida en el presente estudio. En el área de Nueva York, la principal zona de interés de nuestra investigación, un 2% de los ecos eran ecos en punta de lanza”.³⁶

LA MICRODESCENDENTE

3.5.15 El examen de la configuración de los daños ocasionados por las ráfagas descendentes reveló que frecuentemente existían, embutidas en el campo de la corriente de aire de la ráfaga descendente principal, ráfagas descendentes más pequeñas, pero incluso de mayor intensidad, a las que Fujita dio el nombre de “microdescendentes” y las definió como “una corriente descendente que origina una repentina corriente de vientos horizontales que ocasiona estragos en una extensión horizontal de 0,4 a 4 km”.³⁸ La pequeña escala de la microdescendente, en el espacio y en el tiempo, hace que su observación sea casi imposible con los sistemas actuales. Desgraciadamente, esta escala es precisamente la más importante para la aviación, lo que ha conferido considerable urgencia a las investigaciones sobre la dinámica de las tormentas. Las microdescendentes pueden producirse aisladamente o en llamadas “familias” y pueden o no ir acompañadas de lluvia, y aun cuando se las asocia frecuentemente con violentas tormentas, pueden también ser generadas por cualquier nube de convección.

3.5.16 Con objeto de adelantar las investigaciones, la Universidad de Chicago y el Servicio meteorológico nacional de los Estados Unidos organizaron conjuntamente en 1978 un proyecto de recopilación de datos de dos años denominado NIMROD (northern Illinois meteorological research on downburst)³⁸. Durante este período de investigación, se confirmó la existencia de fenómenos de ráfagas descendentes y se obtuvieron las primeras mediciones de la corriente en las microdescendentes sirviéndose del radar Doppler. No obstante, debido a la separación entre los tres radares utilizados, únicamente fue posible analizar los datos de un solo Doppler.⁹ El objetivo siguiente consistía en obtener datos sobre los vientos reales en las ráfagas descendentes/microdescendentes y en torno a ellas, empleando, entre otros dispositivos, radares Doppler múltiples lo suficientemente próximos para efectuar mediciones de la corriente del viento en tres dimensiones. Con objeto de alcanzar este objetivo se organizó el proyecto JAWS (Joint Airport Weather Studies) en el Aeropuerto internacional Stapleton de Denver (Colorado, Estados Unidos) (1982–84).³⁹ En el marco de este proyecto, se empleó, además de la red de observación normal, una extensa serie de medios de observación que comprendía tres radares Doppler todos situados a menos de 30 km uno del otro, un sistema de observación que incluía una mesorred automática móvil (PAM), un conjunto de radiovientosondas en tres estaciones, aeronaves provistas de

g. Según se explica en el Capítulo 5, para la medición a distancia de las tres componentes del viento real, mediante el radar Doppler, por lo menos dos radares deben observar simultáneamente el mismo volumen de la atmósfera. Un solo radar proporciona únicamente datos sobre la velocidad radial del aire en relación con el radar.

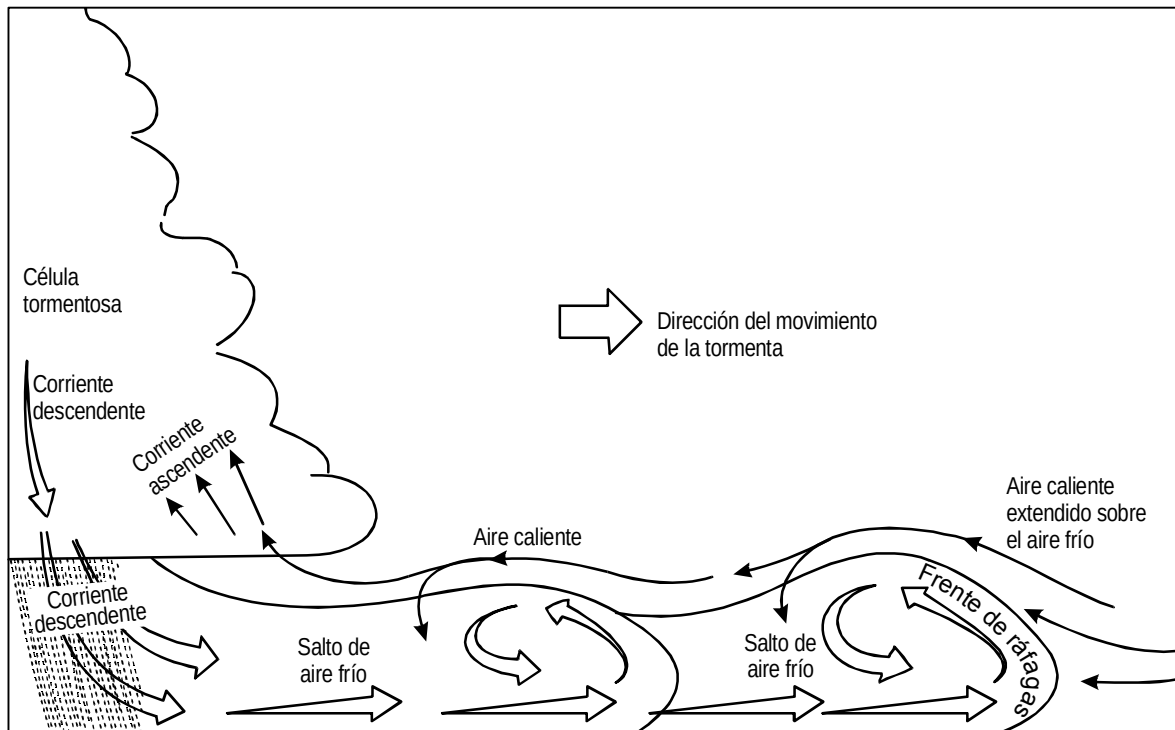


Figura 3-10. Corte vertical de un frente de ráfagas característico
(según el cartel P621 de la OACI "Frentes de ráfagas, turbulencia y gradiente del viento")

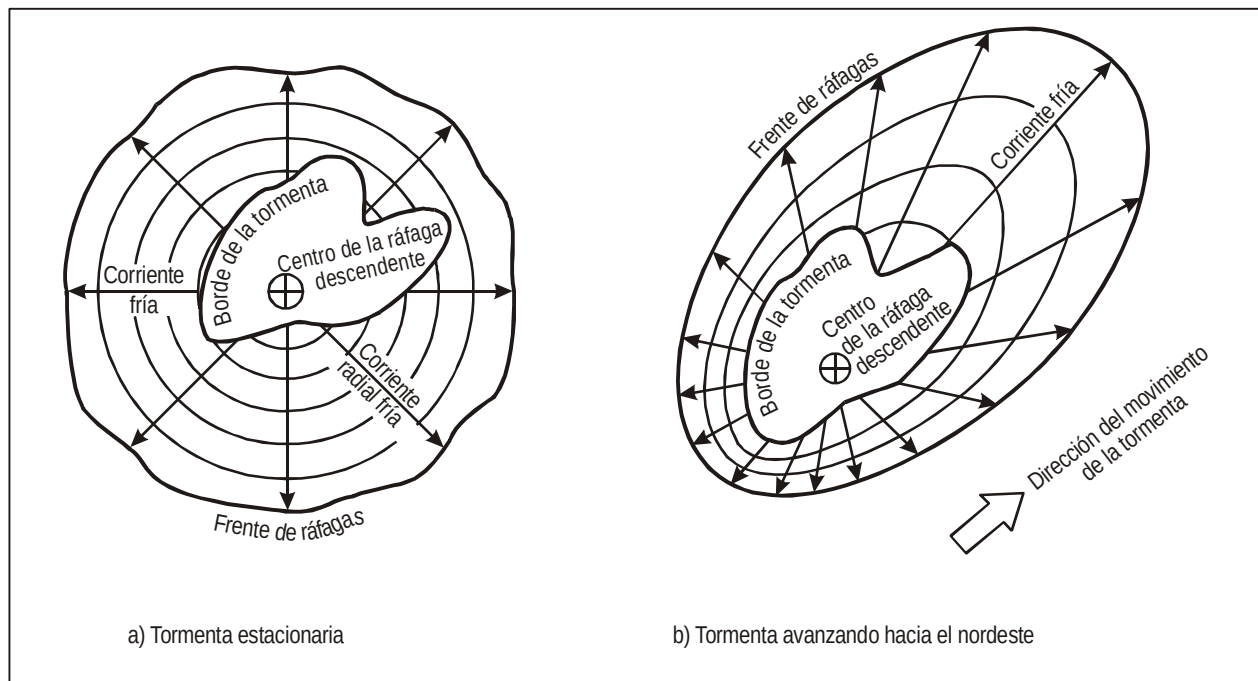


Figura 3-11. Vistas en planta de frentes de ráfagas característicos

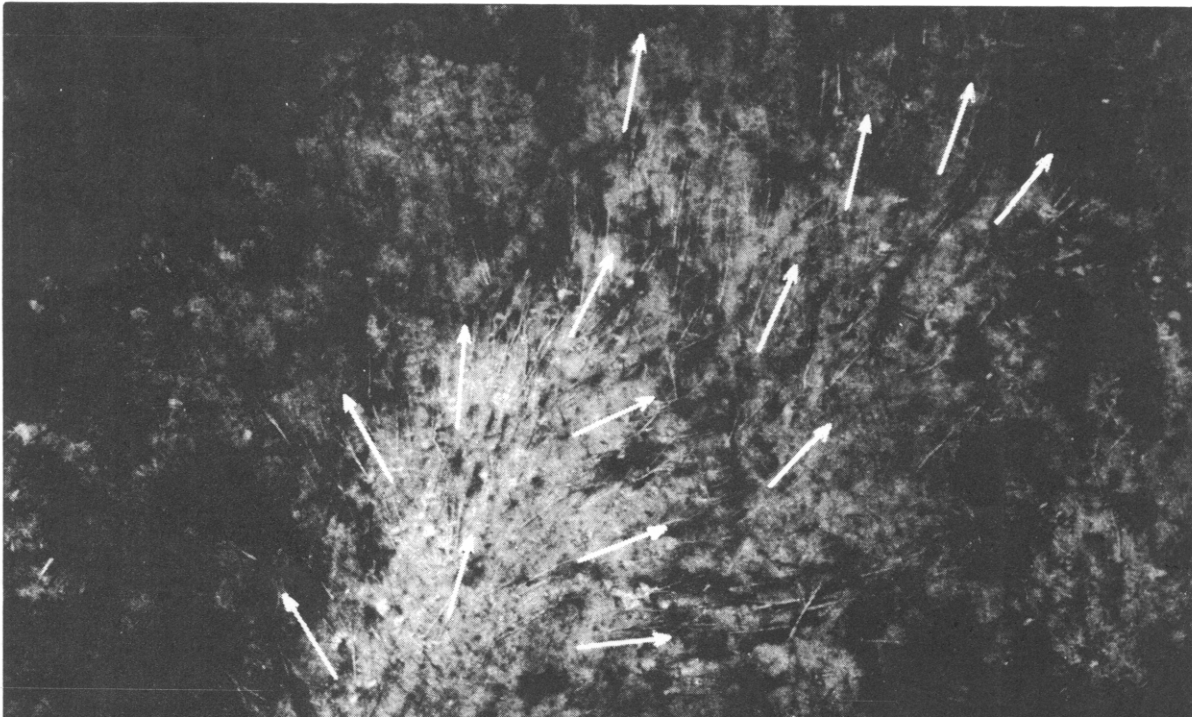


Figura 3-12. Más de 300 árboles derribados por una intensa erupción rafagosa cerca de Beckley (Virginia occidental, Estados Unidos). El autor fotografió configuraciones parecidas de árboles derribados en numerosos lugares al paso de las tormentas y tornados que el 3 de abril de 1974 irrumpieron en los Estados Unidos (Fujita, 1976)

instrumentos, etc. La fase de observación y recopilación de datos de este proyecto se llevó a cabo durante el verano de 1982 y a ésta siguió en 1983–84 una fase de compilación y análisis de datos. Si bien el análisis aún más detallado se proseguirá en el futuro, los resultados han confirmado la existencia y la gravedad de las ráfagas descendentes y de las microdescendentes. Al mismo tiempo, la ráfaga descendente/microdescendente es más compleja de lo que al principio se había imaginado. Por ejemplo, hay indicios de que dentro de las microdescendentes existen estructuras aún más pequeñas y de mayor intensidad que suelen producir, dentro de la corriente de aire general, daños en una faja larga y estrecha muy parecidos a los de un tornado. Para describir estas estructuras, Fujita acuñó el término “burst swath” (“faja segada por la ráfaga”).

3.5.17 Por lo menos 236 microdescendentes fueron los “pescados”, por así llamarlos, capturados en las “redes” de observación de los proyectos NIMROD y JAWS; la Figura 3-13 indica su frecuencia diurna durante el período de los proyectos. La Figura 3-14 muestra la frecuencia de las microdescendentes que ocasionaron las diferencias seleccionadas de velocidad máxima de los vientos en la superficie, medidas en las 186 microdescendentes observadas durante el proyecto JAWS. Las microdescendentes “secas” constituyeron el 36% de las observadas en el proyecto NIMROD y el 83% de las observadas en el proyecto JAWS.⁴⁰ El elevado porcentaje de microdescendentes secas fue sorprendente, a pesar de que la climatología del área de que se trata es conocida porque en ella se forman tormentas de alta base en condiciones relativamente secas en altura. En las áreas más húmedas, por ejemplo, en el sudeste de los Estados Unidos, la mayoría de las microdescendentes son del género “húmedo”. La Figura 3-15⁴¹ ofrece un ejemplo de los campos de viento relacionados con una de las microdescendentes estudiadas en el marco

del proyecto JAWS que indica la posible existencia de un vórtice anular en torno a la microdescendente, lo que pudiera explicar la rápida intensificación de la corriente descendente y su carácter concentrado y localizado. Se ha indicado que estos vórtices anulares pueden formarse en serie, según se muestra en la Figura 3-16.^{42,43} La Figura 3-17⁴⁴ ilustra la posible sucesión de acontecimientos y su escala durante la formación de una microdescendente, según el análisis de los datos del proyecto JAWS.

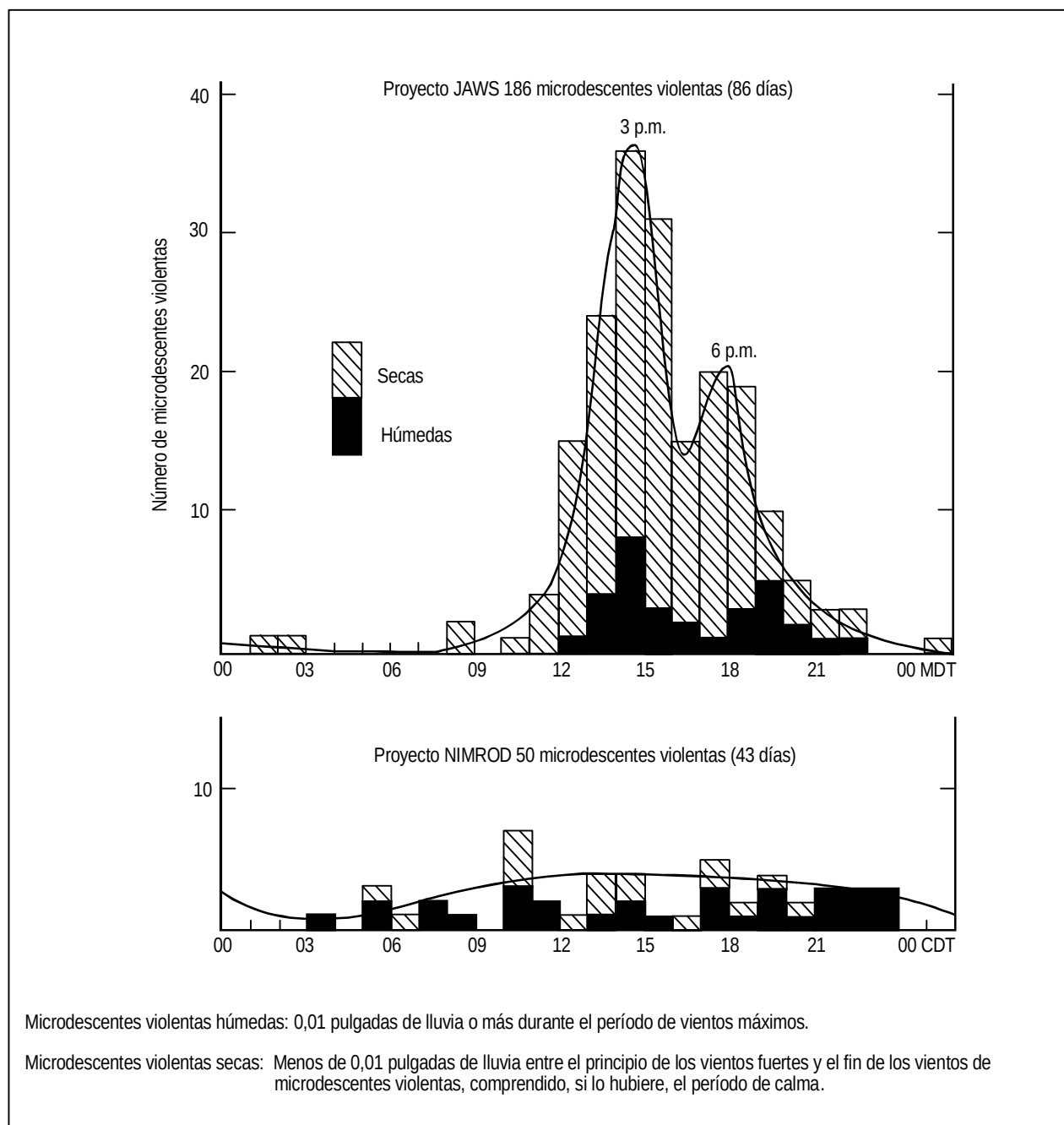


Figura 3-13. Variación diurna de las microdescendentes de superficie de todas las intensidades medidas en las 27 estaciones PAM
(según Fujita y Wakimoto, 1983, con adaptación por la OACI)

3.5.18 La microdescendente tiene carácter efímero y, por lo general, alcanza su máxima intensidad en menos de diez minutos. Como continuación directa y aplicación práctica de los resultados del proyecto JAWS, el National Center for Atmospheric Research (NCAR) de los Estados Unidos y la FAA llevaron a cabo un programa de investigaciones denominado CLAWS (classify, locate, avoid wind shear) que tenía por objeto lograr mayor seguridad operacional. El programa CLAWS, concentrado en la detección y pronóstico de microdescendentes en el Aeropuerto Stapleton de Denver, estaba destinado a proporcionar a los pilotos y a las dependencias de servicios de tránsito aéreo (ATS) avisos previos de cizalladura del viento en tiempo real y a elaborar los procedimientos operacionales necesarios.⁴⁵ Durante el proyecto (2 de julio-15 de agosto de 1984, entre las 11 00 y las 20 00 hora local) se expidieron los avisos siguientes:

Avisos de microdescendentes	30
Avisos de línea de microdescendentes	5
Avisos de cambio de dirección del viento (o de frente de ráfagas)	32
Avisos de tornados	1

3.5.19 Los avisos facilitados al ATC referentes a los cambios de dirección del viento en las pistas ayudaron a los controladores a elegir las pistas apropiadas para los despegues o los aterrizajes. El análisis inicial del proyecto según McCarthy y Wilson (1985)⁴⁵ era el siguiente:

- a) ha quedado claramente demostrado que el radar Doppler puede proporcionar de antemano avisos de microdescendentes y de cambios de dirección del viento;

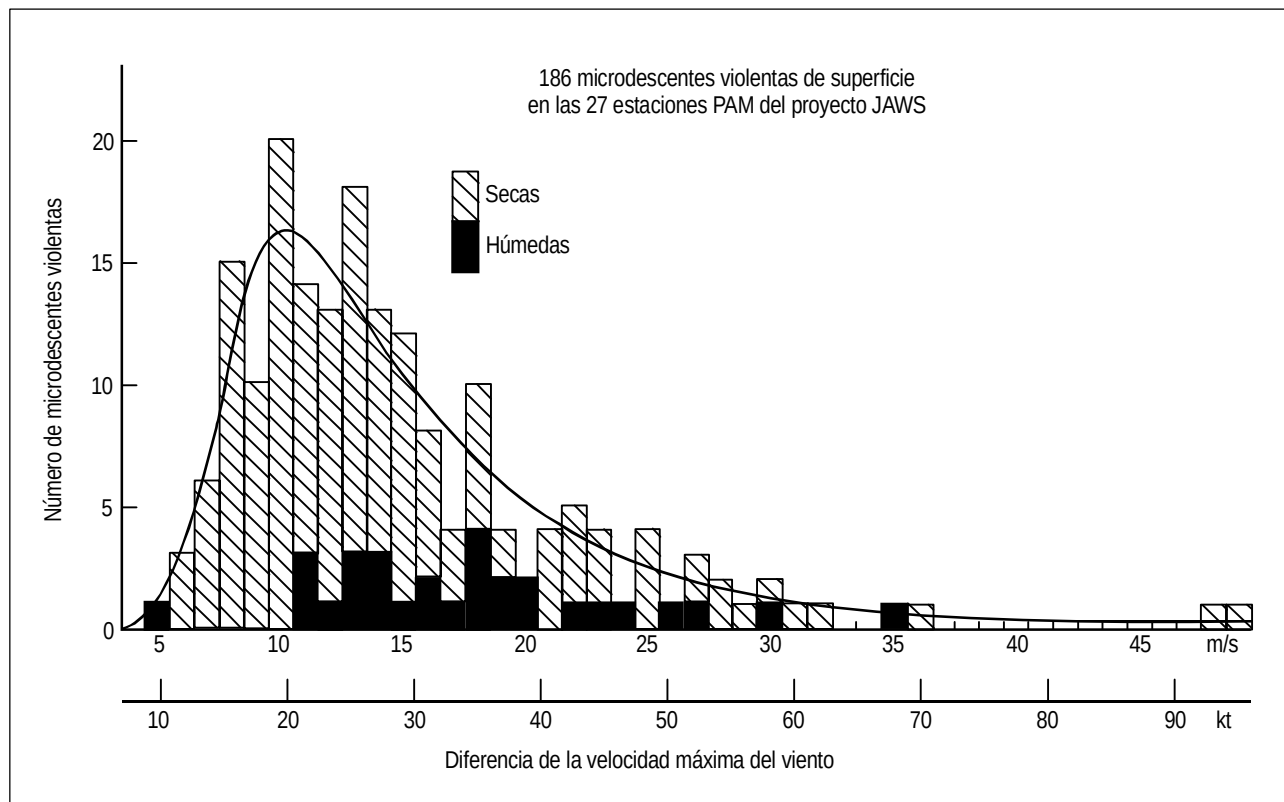


Figura 3-14. Frecuencia de las microdescendentes de superficie en función de las diferencias de la velocidad máxima del viento medidas en las 27 estaciones PAM (según Fujita y Wakimoto, 1983)

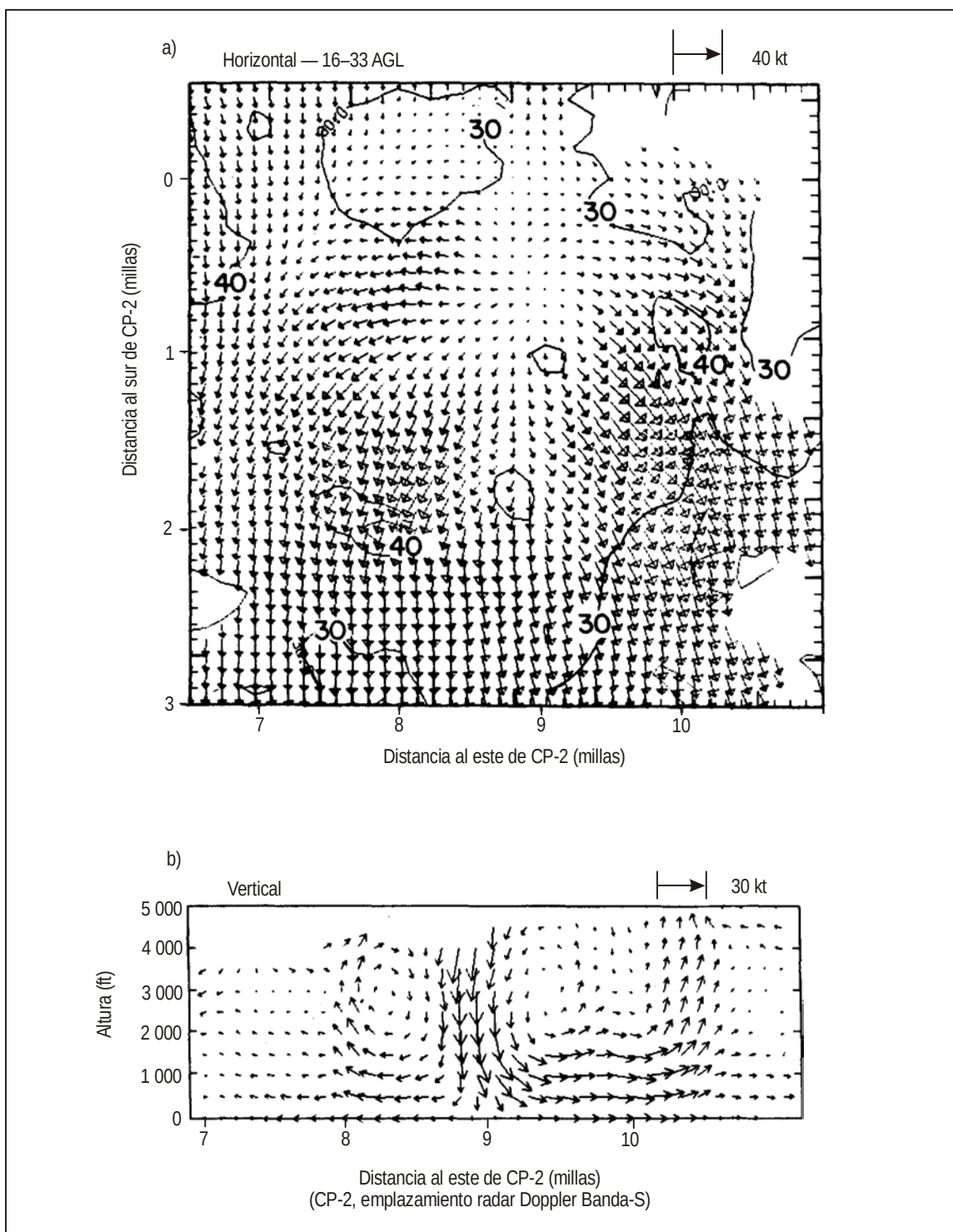
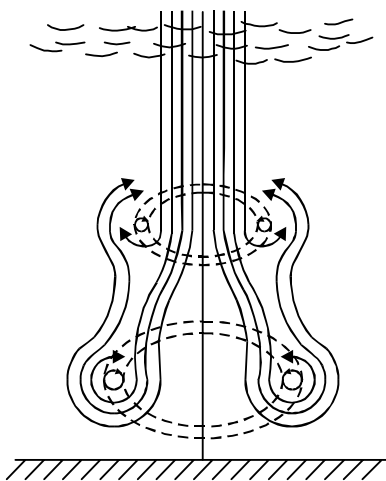


Figura 3-15. Campos de velocidad respecto al suelo, basados en un análisis de los datos de dos radares Doppler relativos a una microdescendente ocurrida el 14 de julio de 1982, a las 1452 MDT
Las isohipsas son los factores de reflectividad radar (dBZ_e)
 (según Wilson y Roberts, 1983, con adaptación por la OACI)



a) Ráfaga descendente en una tormenta. Modelo de corriente en vórtice anular.
(Según Woodfield y Vaughan, 1983, conforme a Caracena)



b) Circulación en vórtice anular relacionada con el borde anterior de una microdescarga violenta.
(Según T. Fujita y B. Smith, Universidad de Chicago, 1985)

Figura 3-16. Vórtice anular

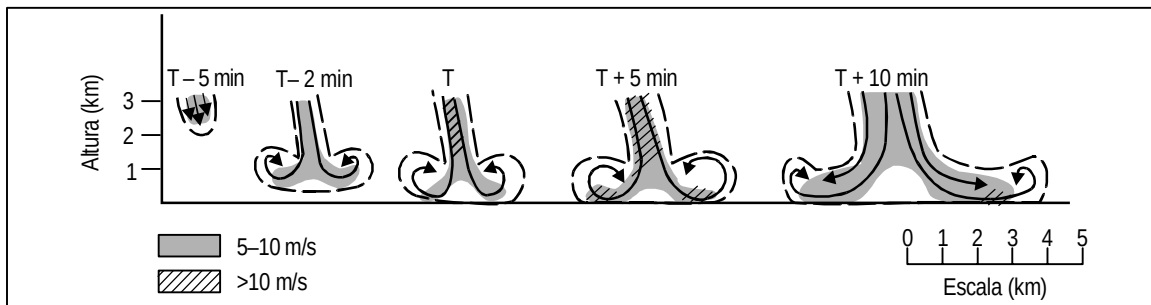


Figura 3-17. Corte vertical de la evolución del campo de viento de una microdescendente; T es el momento de la divergencia inicial en la superficie. La parte sombreada indica las velocidades del vector viento (según Wilson, Roberts, Kessinger y McCarthy, 1984, con adaptación por la OACI)

- b) los pilotos han afirmado claramente que necesitan estimaciones cuantitativas precisas de la cizalladura del viento real a lo largo de las pistas de aproximación o salida, en lugar de una indicación semicualitativa sobre la ubicación de microdescendentes; y
- c) el área de los avisos de microdescendentes para la aviación podría circunscribirse considerablemente a la zona inmediata de las operaciones de aproximación y salida de las aeronaves.

3.5.20 La FAA⁴⁶ ha publicado un informe sobre los aspectos operacionales del proyecto. En dicho informe se llega a la conclusión de que el proyecto CLAWS deparó a la FAA la oportunidad y la experiencia para evaluar la utilidad funcional de dos productos muy simples ligados al radar Doppler para su utilización por las torres de control, es decir, los avisos de microdescendentes y de frentes de ráfagas; el proyecto demostró su utilidad en el Aeropuerto Stapleton — incluso en sus formas primitivas actuales. También proporcionó un acopio de experiencia profesional en lo tocante al empleo de dichos productos.

3.5.21 Además del constante análisis de los datos recopilados durante el proyecto JAWS, se llevaron a cabo investigaciones adicionales sobre microdescendentes en virtud del proyecto “MIST” (microburst and severe thunderstorm), emprendido conjuntamente por la NASA, la Universidad de Chicago y el Marshall Space Flight Centre en los Estados Unidos. Se emplearon hasta cinco radares Doppler, 55 estaciones de observación PAM y radiovientosondas lanzadas cada hora durante los días en que ocurren tormentas.

3.5.22 El anterior y otros proyectos de investigación y el análisis continuo de los accidentes e incidentes de aviación en que la cizalladura del viento se ha citado como factor han confirmado sin lugar a dudas la realidad de los frentes de ráfagas, las ráfagas descendentes y las microdescendentes, así como el serio peligro que pueden plantear para las aeronaves en vuelo. Por consiguiente, los esfuerzos que siguieron en los años 1990 se centraron en la detección de la cizalladura del viento causada por dichos fenómenos utilizando equipo de teledetección basado en tierra y equipo de a bordo de detección y aviso de cizalladura del viento y la comunicación de avisos oportunos a los pilotos. En el Capítulo 5 se describen los resultados positivos de estos esfuerzos.

EL TORNADO

3.5.23 Si bien las microdescendentes producen vientos muy fuertes y peligrosos, el tornado genera los más fuertes de todos los vientos en la superficie. En numerosos aspectos, el tornado es la antítesis de la

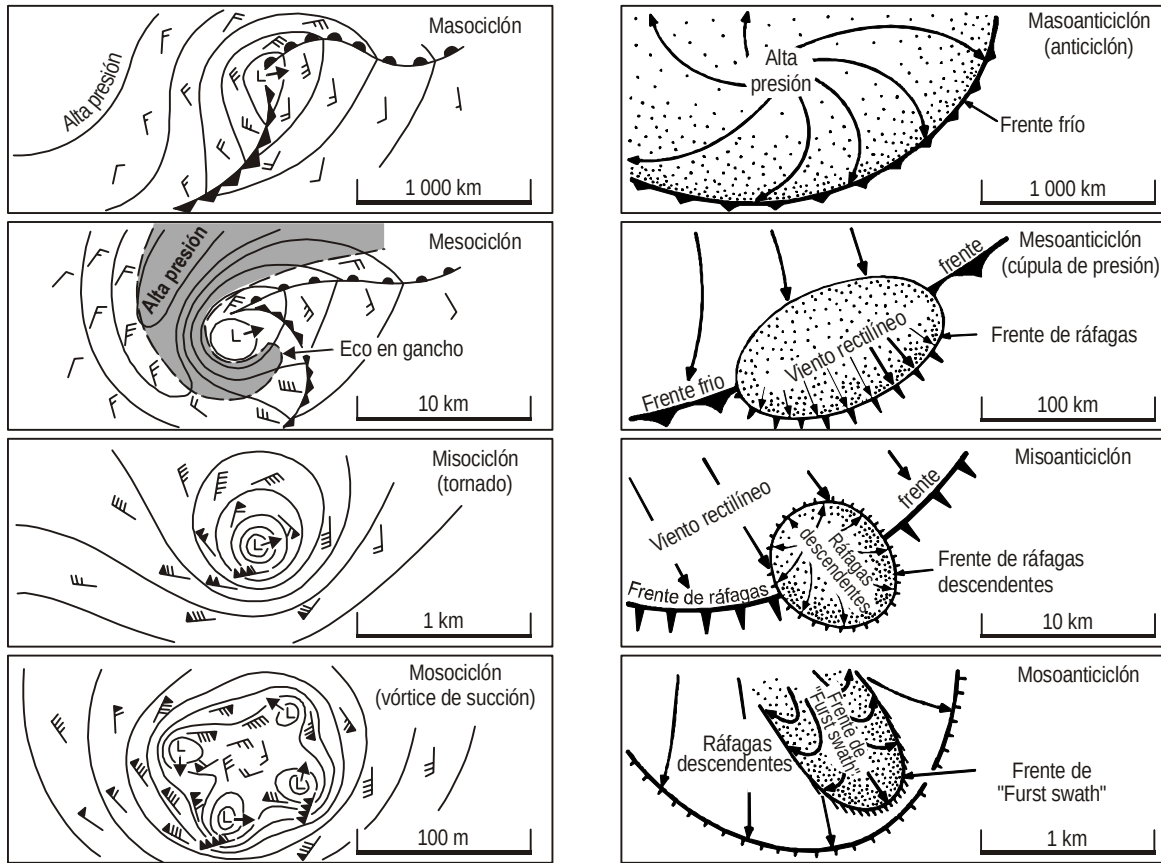
microdescendente; procede de un sistema de baja presión sumamente concentrado cuyo vórtice aspira literalmente el aire circundante, mientras que la microdescendente es un sistema localizado de alta presión en el que los vientos a baja altura divergen a partir de su centro. La Figura 3-18⁴⁷ muestra la estructura y escala generalizadas de los diversos sistemas de presión que producen vientos de superficie destructores, su clasificación con arreglo a las escalas planetarias aceptadas y las velocidades máximas del viento que se prevén, según Fujita (1981). En esta figura, las velocidades máximas del viento están relacionadas con la llamada “escala F”, que se basa en la escala de daños causados por seis clases de velocidad del viento F0 [70–124 km/h (35–62 kt)] hasta F5 [454–552 km/h (227–276 kt)].

3.5.24 Los tornados se producen en las corrientes ascendentes concentradas y persistentes de tormentas violentas. Éstas suelen ser del mismo tipo que las que engendran microdescendentes, si bien los tornados se forman en las corrientes ascendentes y las microdescendentes y frentes de ráfagas en las corrientes descendentes. Naturalmente, hay muchos factores que han de tenerse en cuenta, ya que no en todas las tormentas violentas se forman necesariamente tornados. Una de las más importantes cuestiones con que se enfrentan actualmente los meteorólogos investigadores es saber por qué razón algunas tormentas violentas generan tornados y otras no. Una buena descripción de un tornado dada por Snow⁴⁸ es la siguiente: “Un tornado es un vórtice: el aire gira en torno al eje [vertical] del tornado casi tan rápido como su avance hacia el eje y a lo largo de éste (en movimiento ascendente). Atraído por la presión atmosférica muy baja situada en el centro del tornado, el aire fluye de todas las direcciones hacia la base del vórtice a través de una capa poco profunda de unas pocas decenas de metros de altura en la proximidad del suelo. En la base, el aire se desvía abruptamente para elevarse en espiral en torno al centro y finalmente se mezcla, en el extremo superior oculto del tornado, con la corriente de aire de la nube madre. La presión en la parte central puede ser hasta 10% inferior a la de la atmósfera circundante: casi la misma diferencia que la que existe entre el nivel del mar y una altitud de 1 km (3 300 ft). Los vientos de un tornado son casi siempre ciclónicos.” El absoluto poder destructivo de un tornado se debe a que una proporción de la inmensa cantidad de energía existente en una tormenta violenta se encuentra concentrada en una superficie que no suele tener más de varios cientos de metros de diámetro. La más elevada velocidad del viento medida en un tornado fue de 270 km/h (135 kt);⁴⁷ sin embargo, el análisis de los daños ocasionados por los tornados a estructuras construidas cuya resistencia estructural es conocida, el análisis de las imágenes filmadas del movimiento de escombros que giran en el tornado y el estudio de los espectros de la velocidad del viento obtenidos por el radar Doppler indican que las velocidades máximas del viento se aproximan a 400 km/h (200 kt) o son incluso superiores.^{49,50}

3.5.25 La mayoría de los tornados (y todos los violentos) se forman dentro los denominados “mesociclones”^h que frecuentemente también figuran en los informes de intenso granizo y vientos de ráfagas descendentes destructores [véase la Figura 3-18 a)]³⁰. Habida cuenta de que no todos los mesociclones producen tornados, la presencia de un mesociclón es una condición necesaria, aunque no suficiente, para su formación.

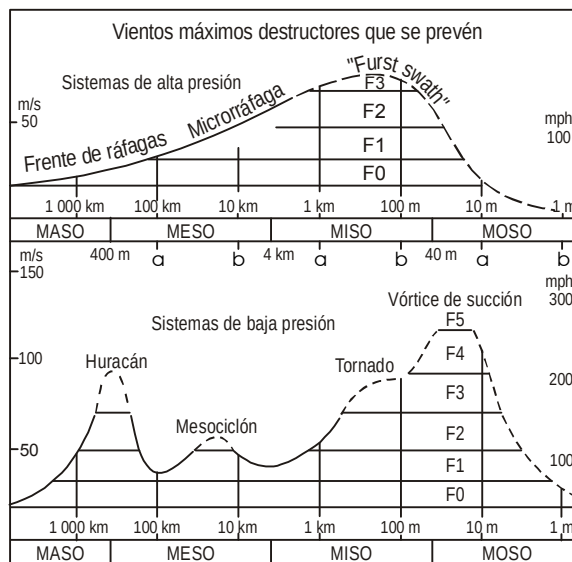
3.5.26 El análisis de los daños ocasionados por los vientos de un tornado indica la existencia de intensos “vórtices de succión” organizados dentro del tornado que los engendró [su escala se indica en la Figura 3-18 a)]. En la Figura 3-19 se muestra un modelo de un tornado de este género presentado por Fujita⁴⁷. Con frecuencia, los tornados son inicialmente visibles como una “tromba” suspendida por debajo de la nube tormentosa que los engendró. La tromba suele tener la forma de cono, pero también puede tener muchas otras formas, entre ellas la parecida a una larga cuerda arrastrada. Los tornados que se forman

h. Un mesociclón es un vórtice ciclónico a mesoescala cuyo núcleo tiene un diámetro de 3 a 9 km que frecuentemente produce una “signatura” radar que puede ser reconocida.



a) Maso-, meso-, miso- y mosociclones con arreglo a escalas planetarias generalizadas. La succión sigue el orden de las vocales a, e, i, o y u.

b) Maso-, meso-, miso- y mosoant ciclones con arreglo a escalas planetarias generalizadas.



c) Velocidades máximas del viento que se prevén trazadas en función de la escala de los sistemas de alta y de baja presión. Debe observarse que los vientos más fuertes de la ráfaga que soplan hacia el exterior se producen en la ráfaga descendente a misoescala (microdescendente violenta), mientras que la velocidad máxima del viento de los tornados no excede 90 m/s fuera de los "swath" de los vórtices de succión encastrados.

Figura 3-18. Escalas planetarias generalizadas
(según Fujita, 1981, con adaptación por la OACI)

sobre el agua tienen la configuración de “trombas marinas”ⁱ cuya distribución mundial es mucho más extensa que la de los tornados que se forman sobre tierra firme.⁵¹

3.5.27 Es evidente que los tornados representan un caso extremo de la cizalladura del viento y que constituyen un peligro para las aeronaves que aterrizan y despegan. Dicho peligro podría mitigarse en cierta medida, habida cuenta de que:

- a) los tornados suelen ser visibles y las aeronaves deberían poder maniobrar en torno a ellos; y
- b) aun cuando se haya notificado la presencia de tornados en muchas zonas del mundo, éstos suelen producirse con mayor frecuencia en la zona central y sudoriental de los Estados Unidos y, por consiguiente, constituyen un “peligro conocido” en esas zonas.

No puede tomarse demasiado a la ligera el peligro que representan los tornados para la aviación puesto que no siempre son visibles. Por ejemplo, pueden formarse en las corrientes ascendentes a lo largo del frente de ráfagas que precede a la tormenta o hallarse encubiertos por nubes o fuertes lluvias y también pueden producirse de noche (véase el Capítulo 4). Además, si un tornado atraviesa la trayectoria de vuelo de una aeronave, puede haber peligro si ésta encuentra el aire perturbado y la cizalladura del viento en la estela del vórtice o en el vórtice del tornado dentro de nubes.

LA SUPERCÉLULA TORMENTOSA

3.5.28 En 3.5.5 y en la Tabla 3-1 se mencionan las “supercélulas” tormentosas, cuyas características principales, que las distinguen de otras formaciones tormentosas violentas, son:

- a) su carácter unicelular;
- b) la persistencia de esta célula única dominante en un estado casi estacionario durante períodos de tiempo relativamente largos;
- c) las corrientes ascendentes y descendentes sumamente potentes dentro de esta célula, que se apoyan recíprocamente en una relación simbiótica casi biológica;
- d) la tendencia a avanzar hacia la derecha de la corriente media del viento; y
- e) los desmesurados daños que puede producir el granizo que las acompaña y, en algunas regiones del mundo, los ocasionados por las familias de tornados y microdescendentes.⁵²

El término “supercélula” fue acuñado por Browning en 1962 en relación con una tormenta de granizo muy violenta que ocasionó extensos daños cerca de Wokingham (Inglaterra) en julio de 1959. La Figura 3-20.⁵³ muestra un esquema de la estructura característica de una supercélula tormentosa que ha sido posible obtener de forma bastante detallada sirviéndose de las observaciones de tales tormentas efectuadas con radares Doppler múltiples y simulaciones en computadora.²⁹

3.5.29 La más importante de las características de una tormenta con supercélula quizás sea la corriente ascendente muy intensa y casi estacionaria alimentada por aire húmedo, potencialmente inestable, procedente de los niveles inferiores en el costado derecho de la tormenta. Se ha estimado que las

i. Hay dos tipos de trombas marinas: una que se forma extendiéndose hacia abajo desde la base de nubes cumulonimbus y que puede considerarse como un tornado sobre el agua; la otra se forma extendiéndose hacia arriba como una columna de agua giratoria desde la superficie del mar, que no está directamente relacionada con una nube y que se asemeja más a los “remolinos de polvo” que se levantan del suelo.

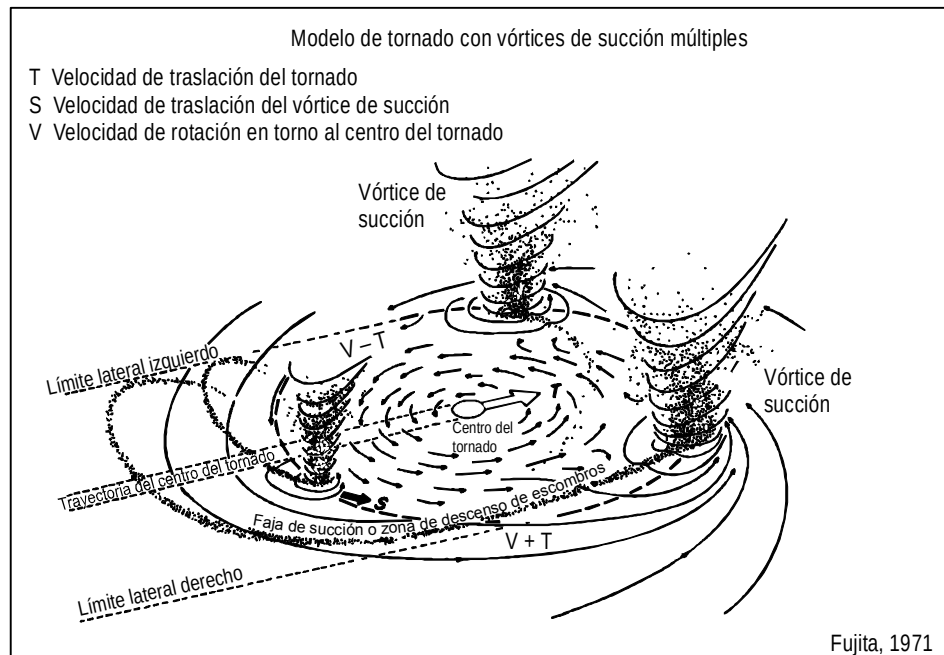


Figura 3-19. Modelo de un tornado con varios vórtices de succión
(según Fujita, 1971, con adaptación por la OACI)

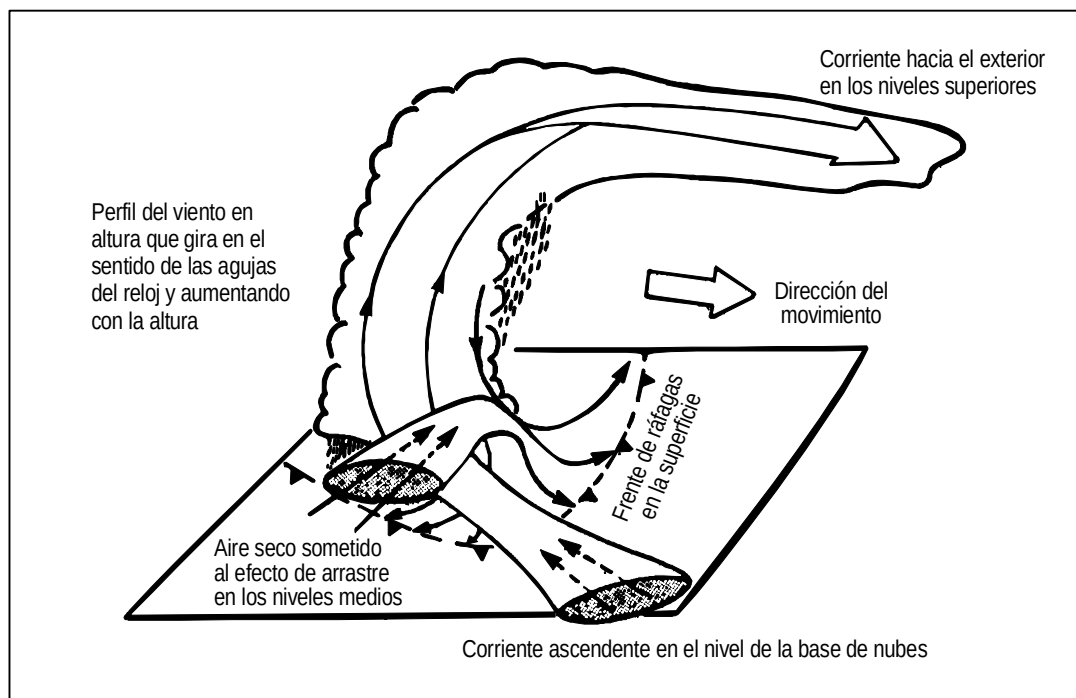


Figura 3-20. Estructura esquemática de una “supercélula” tormentosa
(según A.J. Thorpe, 1981)

velocidades máximas en la corriente ascendente eran superiores a 40 m/s (o casi 8 000 ft/min) y que la corriente ascendente puede persistir y mantener una identidad definida hasta durante dos horas. El aire arrastrado en la corriente ascendente tiene también la tendencia a adquirir, al elevarse, un movimiento de rotación ciclónica que crea condiciones especialmente favorables a la formación de tornados.

3.5.30 La corriente descendente se encuentra más frecuentemente en el costado izquierdo de una supercélula tormentosa, (es decir, en relación con la dirección de avance de la tormenta), alimentada por aire seco, potencialmente frío, procedente de los niveles intermedios, con velocidades del mismo orden que las que existen en la corriente ascendente. Se ha estimado que cuando el frente de ráfagas producido por la corriente descendente se propaga a aproximadamente la misma velocidad que la tormenta, ello podría dar por resultado una región casi estacionaria de convergencia a baja altura por debajo de la corriente ascendente, lo que entraña una elevación constante de aire húmedo que penetra a baja altura a lo largo del costado derecho de la tormenta, lo cual mantiene la corriente ascendente.

3.5.31 Como se ha mencionado en 3.5.5, las condiciones atmosféricas necesarias para la formación de supercélulas tormentosas, suponiendo que las condiciones sean lo suficientemente inestables, son que el viento gire en el sentido de las agujas del reloj (hemisferio norte) que su fuerza aumente con la altura (cizalladura $\geq 0,001 \text{ s}^{-1}$) y que existan a todos los niveles vientos bastante fuertes. El aire muy seco en lo alto origina la formación de fuerte granizo. Afortunadamente, las supercélulas tormentosas no son muy extensas ni ocurren con frecuencia, porque el granizo, las microdescendentes y los tornados que las acompañan son sumamente peligroso para el aterrizaje y el despegue de las aeronaves.

3.5.32 Se deduce de las recientes investigaciones efectuadas respecto a incidentes ocurridos a aeronaves que encontraron fuertes turbulencias CAT o cizalladura del viento a niveles de vuelo en crucero, lo que ocasionó una pérdida temporal del mando y un descenso no controlado, que tales regiones se sitúan frecuentemente a sotavento respecto a un área de violentas tormentas, entre los niveles de vuelo 350 y 450. Si bien es necesario proseguir los trabajos sobre este problema, los primeros resultados indican que la turbulencia y la cizalladura del viento pueden ser ocasionados por las cimas de tormentas violentas, tal vez debido a una interacción entre las cimas en plena evolución y las corrientes en chorro que pasan por su cercanía o de la inversión de la tropopausa. También se considera que los vórtices y las ondas pueden formarse a alguna distancia a sotavento de las cimas de las tormentas.⁵⁴ Las aeronaves que se dirigen al encuentro del viento pueden prever que se les avise que existen perturbaciones ondulatorias por delante de ellas (es decir, contra el viento) la primera vez que encuentren las ondas o vórtices que se están disipando; en cambio, no se expediría ningún aviso a las que crucen la corriente de aire o que avancen en el mismo sentido de dicha corriente. El Ames Research Centre de la NASA, en California, está tratando de elaborar un modelo destinado a los simuladores de vuelo, que pueda reproducir tales efectos respecto a distintos tipos de aeronaves.

3.6 CLIMATOLOGÍA DE LA CIZALLADURA DEL VIENTO CONVECTIVA

3.6.1 La Figura 3-21⁵⁵ muestra la distribución anual de la frecuencia de tormentas en todo el mundo y la Figura 3-22⁵⁶ ilustra su distribución sobre los Estados Unidos. La Tabla 3-2⁵⁷ muestra las regiones de los Estados Unidos de mayor actividad tormentosa, con las correspondientes variaciones diurnas y estacionales. La Figura 3-23⁵⁸ indica la distribución mundial de los accidentes e incidentes en los cuales se confirmó o se supuso que las microdescendentes habían sido la causa contribuyente, mientras que la Figura 3-24⁵⁹ muestra las trayectorias de los tornados violentos confirmados, señalados en los Estados Unidos entre 1880 y 1982.

3.6.2 En la Figura 3-21 se ve que las tormentas ocurren con más frecuencia en regiones continentales tropicales. Sin embargo, se sabe que la distribución geográfica de los tornados no se ajusta a esta

configuración. Aun cuando los tornados se producen ocasionalmente en muchas regiones del mundo y las trombas tienen una distribución más extensa por encima de lagos y océanos, la mayoría de los tornados ocurren en el centro y en el sudeste de los Estados Unidos. No se conoce la distribución mundial de las microdescendentes violentas, debido principalmente a que no suelen ser visibles directamente, e incluso a que sus efectos, tales como los daños ocasionados en los bosques y las cosechas, tal vez no se atribuyan a una microdescendente violenta, a no ser que se haga un reconocimiento aéreo minucioso de los daños.

3.6.3 Las microdescendentes violentas no alcanzaron notoriedad hasta hace sólo unos 10 años, al haberseles atribuido varios accidentes o incidentes de aviación; su distribución aparente se centrará como consecuencia en torno a las áreas terminales de tránsito aéreo de mucha actividad. Las microdescendentes violentas son bastante comunes, pero como son relativamente pequeñas y de corta duración, es bastante escasa la probabilidad de que una aeronave las encuentre durante el aterrizaje o el despegue, si bien, como lo han demostrado varios accidentes importantes, la posibilidad de que ello ocurra no es en modo alguno insignificante.

3.7 ESTADÍSTICAS SOBRE LA CIZALLADURA DEL VIENTO A POCA ALTURA EN LA PROXIMIDAD DE LOS AERÓDROMOS

3.7.1 Se ha obtenido un considerable volumen de datos de todo el mundo sobre la cizalladura del viento a baja altura en la proximidad de los aeródromos sirviéndose de los sistemas de a bordo de registro de datos (AIDS) de los aviones de reacción de fuselaje ancho B-747 de la British Airways (BA)⁶⁰ y B-747 y DC-10 de la Royal Dutch Airlines (KLM)^{61,62}. En 1984, en la base de datos figuraban ya 10 000 aterrizajes de KLM, de los cuales 8 573 han sido ya analizados^{j,63} y publicados algunos datos seleccionados, así como 9 136 aterrizajes de BA, todos los cuales han sido analizados y sus resultados publicados. En Alemania, se han recopilado durante un año, almacenado y luego analizado los datos obtenidos mediante sistemas AIDS instalados en aeronaves Airbus A300 de la Deutsche Lufthansa.⁶⁴

3.7.2 El Royal Aircraft Establishment (RAE) del Reino Unido analizó los datos relativos a los aterrizajes de BA, aplicando el método de ráfagas discretas. En la Tabla 3-3⁶⁰ se muestran las estadísticas de las probabilidades de que en uno de cada mil aterrizajes se encuentre cizalladura del viento con determinados tipos de cambios de la velocidad del viento de frente; estas probabilidades han sido calculadas basándose en más de 9 000 aterrizajes de BA. Respecto a los datos de KLM, se ha publicado un análisis detallado referente a 1 909 aterrizajes efectuados en el Aeropuerto de Schiphol (Países Bajos) y un análisis de los aeropuertos mundiales que constituyen "los casos peores". Estos datos han permitido calcular diversas estadísticas de probabilidades: la Figura 3-25 muestra la distribución de la densidad de probabilidades de cambio del viento longitudinal por 30 m (100 ft) de altura, mientras que en la Figura 3-26 se ilustran las probabilidades de que se excedan determinados valores de cizalladura del viento, todos los cuales corresponden al Aeropuerto de Schiphol.⁶¹

3.7.3 Una de las razones que indujeron a organizar estos proyectos de investigación consistía en suministrar datos de los cuales se pudieran obtener modelos prácticos de cizalladura del viento destinados a los ensayos de los sistemas de control y de presentación instalados en las aeronaves, así como de los sistemas de detección y de aviso de cizalladura del viento a poca altura instalados a bordo de las aeronaves. Al mismo tiempo, estos proyectos suministran datos valiosos relativos al tipo e intensidad de la cizalladura del viento en muchos aeródromos de todo el mundo.^k En la nota de Woodfield y Woods se analizan las variaciones de la cizalladura del viento en distintos aeródromos en los términos siguientes:

j. El Netherlands National Aerospace Laboratory ha publicado ya (1984) los datos restantes analizados junto con una evaluación de diversos tipos de equipo de detección de cizalladura del viento instalado a bordo. La publicación existe en neerlandés con un resumen en inglés.

k. Los lectores interesados en cizalladura del viento en determinados aeródromos podrían consultar las notas originales de Woodfield y Woods (1984)⁶⁰, así como de Haverdings (1981)⁶².

Sea cual fuere el grado de cambio excesivo, en el aeropuerto en que existen las mayores cizalladuras del viento se originan cambios de velocidad que no exceden aproximadamente del doble de los que ocurren en los aeropuertos en que se producen las cizalladuras más pequeñas. Entre estos aeropuertos, los más bajos niveles de cizalladura se registraron en Nairobi (NBO), Kuala Lumpur (KUL) y Singapur (SIN). Los aterrizajes en NBO se realizan en su mayor parte poco después de la salida del sol, cuando la actividad atmosférica se encuentra más en calma. En cambio, en KUL y SIN los aterrizajes se efectúan durante las últimas horas de la tarde; estos aeropuertos son también conocidos por sus niveles de actividad tormentosa durante el verano.

Los mayores niveles de cizalladura ocurrieron en Hong Kong (HKG, RW 31 solamente), Nueva York (JFK) y Londres (LHR) en plataformas simples y en Hong Kong (HKG RW 31 solamente) en plataformas dobles. Hong Kong está rodeado de un relieve montañoso accidentado y es bien conocido por el elevado grado de turbulencia al efectuar la aproximación. Sólo pudieron analizarse las aproximaciones a la pista 31 puesto que los aterrizajes de la pista 31 exigen un desplazamiento del sistema de aterrizaje por instrumentos y un último cambio de rumbo de 50°. En general, ha quedado bien establecida la forma de las distribuciones, incluso con apenas más de cien aterrizajes en un aeropuerto. Se prevé que forme parte de la distribución respecto a las plataformas dobles de San Francisco (SFO) forme parte del esquema general si se extrae una muestra mayor.

Por consiguiente, por ser un aeropuerto focal [de la British Airways], LHR es uno de los aeropuertos de importantes cizalladuras del viento y, habida cuenta de que la selección general de aeropuertos es representativa de una gran variedad de condiciones en todo el mundo, se estima que las distribuciones generales son representativas de la mayoría de los sistemas de rutas internacionales.

Haverding⁶² hace la clasificación siguiente de los aeropuertos que constituyen “los casos peores” (basándose en 300 aterrizajes o más), desde el más elevado al más bajo porcentaje de aterrizajes con cizalladura del viento: JFK (Nueva York), Houston, Montreal, Schiphol (Ámsterdam), Dubai, Singapur y Bangkok.

3.7.4 El Laboratorio aeroespacial nacional (NLR) de los Países Bajos ha analizado también los datos mundiales de KLM por el método de ráfagas discretas. Se prevé que RAE y NLR intercambien sus datos y que se incluyan datos de otras fuentes, tales como los de Lufthansa. En conjunto, la base de datos tal vez contenga más de 20 000 aterrizajes efectuados en todo el mundo, en una gran variedad de condiciones estacionales. Se prosigue la recopilación de datos sobre importantes cizalladuras del viento como proyecto permanente en el marco del United Kingdom Civil Aviation Airworthiness and Data Recording Programme (CAADRP). Esto proporcionará más datos “extremos” que quizás permitan mejorar la clasificación de la intensidad de la cizalladura del viento (véanse 5.2.5 a 5.2.14).

3.8 VÓRTICES DE ESTELA

3.8.1 Por detrás de toda aeronave en vuelo se produce una cizalladura del viento, principalmente como vórtices en los extremos de las alas que adoptan la forma de dos masas de aire cilíndricas que giran en sentido contrario y que forman una estela por detrás de los extremos de ala. Estos vórtices son especialmente violentos cuando son engendrados por aviones de reacción de grandes dimensiones; los que son generados por las aeronaves durante el despegue pueden constituir un importante peligro para las aeronaves que las siguen muy cerca. Aun cuando los vórtices de estela constituyen un caso especial de cizalladura del viento, no se les trata del mismo modo. Ello se debe a que puede evitarse su efecto en las aeronaves que aterrizan y despegan mediante la aplicación de las mínimas de separación apropiadas por las ATS. En los Capítulos 6 y 7 de los *Procedimientos para los servicios de navegación aérea — Gestión del tránsito aéreo* (Doc 4444) figuran detalles y orientación sobre los procedimientos que siguen las dependencias ATS para aplicar las mínimas de separación entre aeronaves, con objeto de reducir los riesgos inherentes a los vórtices de estela y la cizalladura del viento.

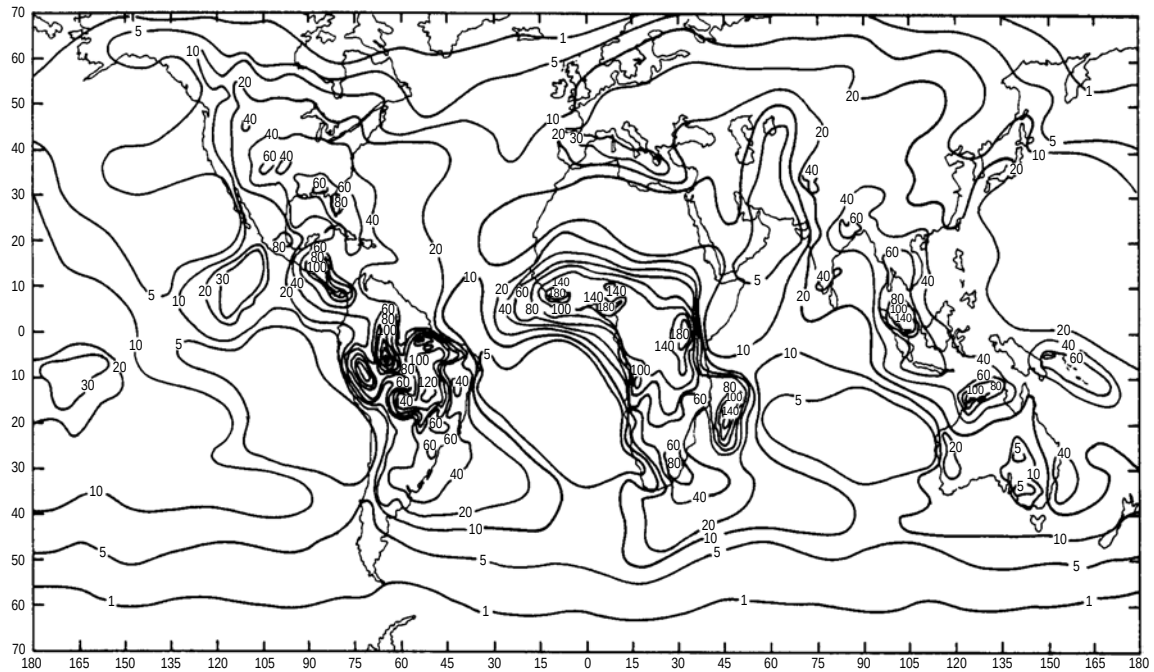


Figura 3-21. Número anual medio de días de tormenta en las distintas regiones del mundo
(fuente: Publicación núm. 21 TP21, 1953 de la OMM)

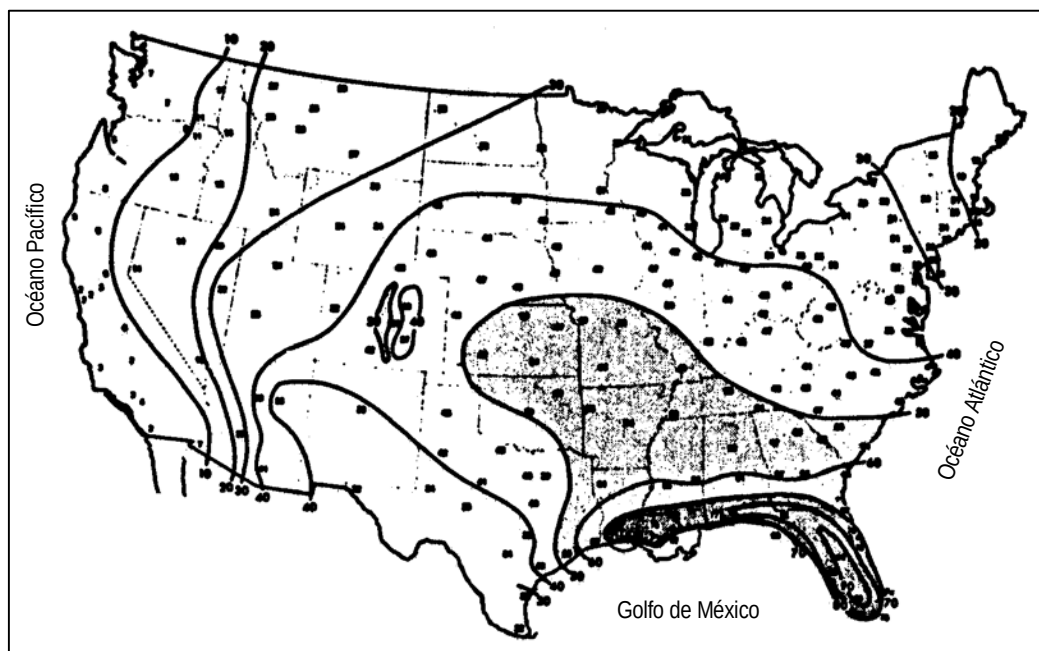


Figura 3-22. Número anual medio de días de tormenta en los Estados Unidos, 1951–1975
(según Court y Griffiths, 1982)

Tabla 3-2. Regiones de los Estados Unidos más afectadas por las tormentas
(según Easterling y Robinson, 1985)

Región	Primavera		Verano		Otoño		Invierno	
	t	A	t	a	t	a	t	a
Costa occidental	A	H	—	—	A/N	L/M	A/N	M
Inter-Montane	A	H	A/N	H	A	H	—	—
Planicies del oeste	A/N	M/H	A/N	M/H	A/N	M/H	—	—
Centro	N	L	N	L	N	L	—	—
Grandes lagos	N	L	N	L	N	L	N	L
Nordeste	A	M	A	M	A	M	—	—
Sudeste	A	L/M	A	H	A	H	N	L
Península de la Florida	A	M	A	H	A	H	A	L
Costa del Golfo	M/A/N	L	M/A	M/H	M/A	M	N/M	L
t = momento del día	M = mañana		a = amplitud:		L = reducida ($\leq 0,5$)			
	A = tarde				M = mediana (0,5–1,0)			
	N = noche				H = elevada ($\geq 1,0$)			

Tabla 3-3. Cizalladura del viento por encima de plataformas simples, con una probabilidad de 1 en 1 000 aterrizajes — datos mundiales
(según Woodfield y Woods, 1984)

Longitud nominal de plataforma <i>M</i>	Longitudes de plataformas para 1 000 aterrizajes	Cambio de velocidad (longitud de plataforma) ^{1/3} (m/s)/m ^{1/3}	Longitud de plataforma <i>m</i>	Cambio de velocidad <i>kt</i>	Gradiente <i>kt/100 m</i>
305	30 000	–1,04	200	–11,8	–5,9
			300	–13,5	–4,5
			400	–14,9	–3,7
609	15 000	–0,85	400	–12,2	–3,0
			600	–13,9	–2,3
			800	–15,3	–1,9
1 218	7 500	–0,78	800	–14,1	–1,8
			1 200	–16,1	–1,3
			1 600	–17,7	–1,1

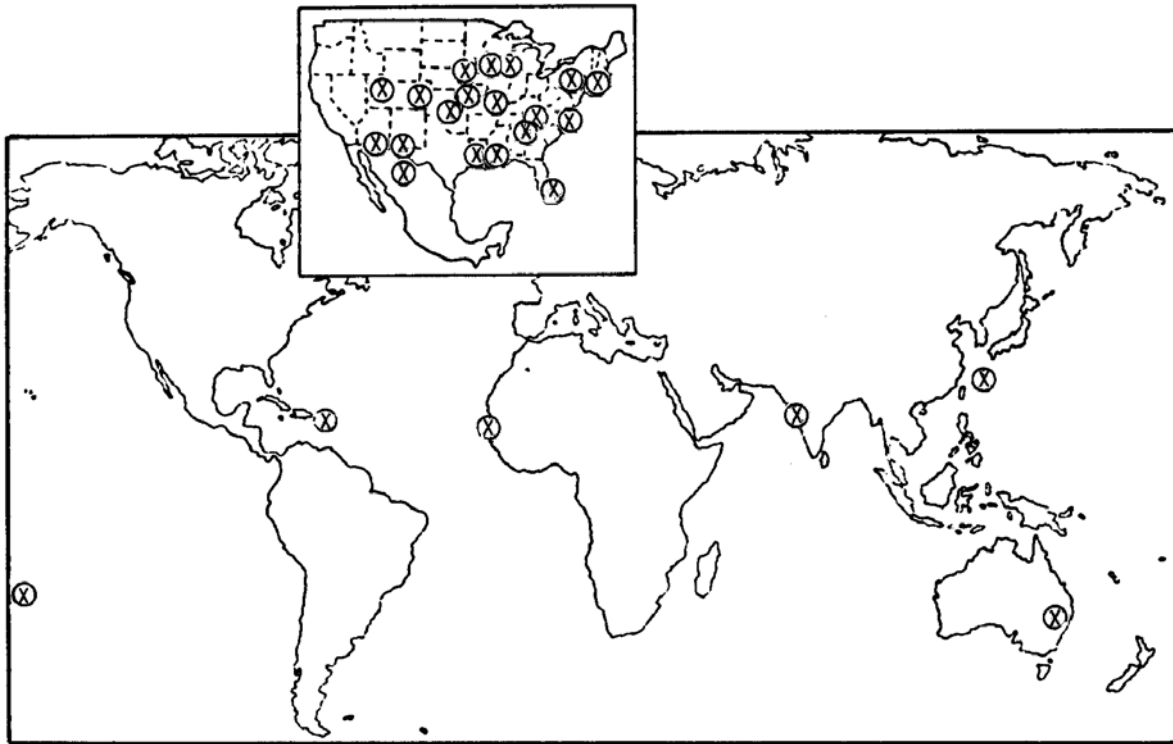


Figura 3-23. Distribución de los accidentes o incidentes en los que se ha confirmado o supuesto la presencia de microdescendentes
(según McCarthy y Wilson, 1984, con adaptación por la OACI)

3.8.2 Varios países (p. ej., Alemania, Estados Unidos, Países Bajos y el Reino Unido) están llevando a cabo investigaciones para elaborar un “sistema destinado a evitar los vórtices de estela” que, basándose en información meteorológica en tiempo real pertinente, permita a los controladores de tránsito aéreo (ATCO) evaluar el momento en que la pista quede libre de vórtices, lo cual, a su vez, contribuirá a reducir los intervalos medios entre los aterrizajes (es decir, las mínimas recomendadas de separación entre vórtices de estela) con objeto de hacer frente al incremento del tráfico aéreo.^{65,66} Sin embargo, cabe observar que si bien estos experimentos tienden a confirmar la viabilidad técnica del sistema, ha sido difícil implantarlo operacionalmente debido a razones de carácter práctico. Sin embargo, a medida que se cuente, en los aeropuertos de mayor tráfico y con capacidad limitada (véase 5.1.10), con sistemas de observación meteorológica plenamente integrados que proporcionen una imagen cuadridimensional del campo del viento sobre el aeropuerto, la introducción de pronósticos sobre vórtices de estela podría llegar a ser económica y operacionalmente viable para contribuir al aumento de la capacidad de las pistas y del espacio aéreo terminal.

3.8.3 En la elaboración de sistemas relacionados con vórtices de estela en los Estados Unidos se toma plena ventaja de los diversos sistemas de detección del viento ya instalados en numerosos aeródromos, como parte del ITWS (véanse 5.1.31 y siguientes). Se elaboraron algoritmos específicos para combinar estos datos, tales como el algoritmo Doppler de establecimiento de perfiles, que constituía el sistema de análisis del viento AVOSS (AWAS) prototipo. Estos han demostrado que pueden obtenerse perfiles precisos del viento con una resolución vertical de 50 m a partir de los datos del radar meteorológico terminal Doppler (TDWR)⁶⁷ (véanse 5.1.17 a 5.1.42). La próxima etapa consistirá en diseñar un algoritmo para formatear un mensaje apropiado para el ATC y los pilotos a fin de avisar sobre cizalladuras de perfil que sean suficientemente fuertes como para afectar a su aproximación y aterrizaje en el aeródromo.

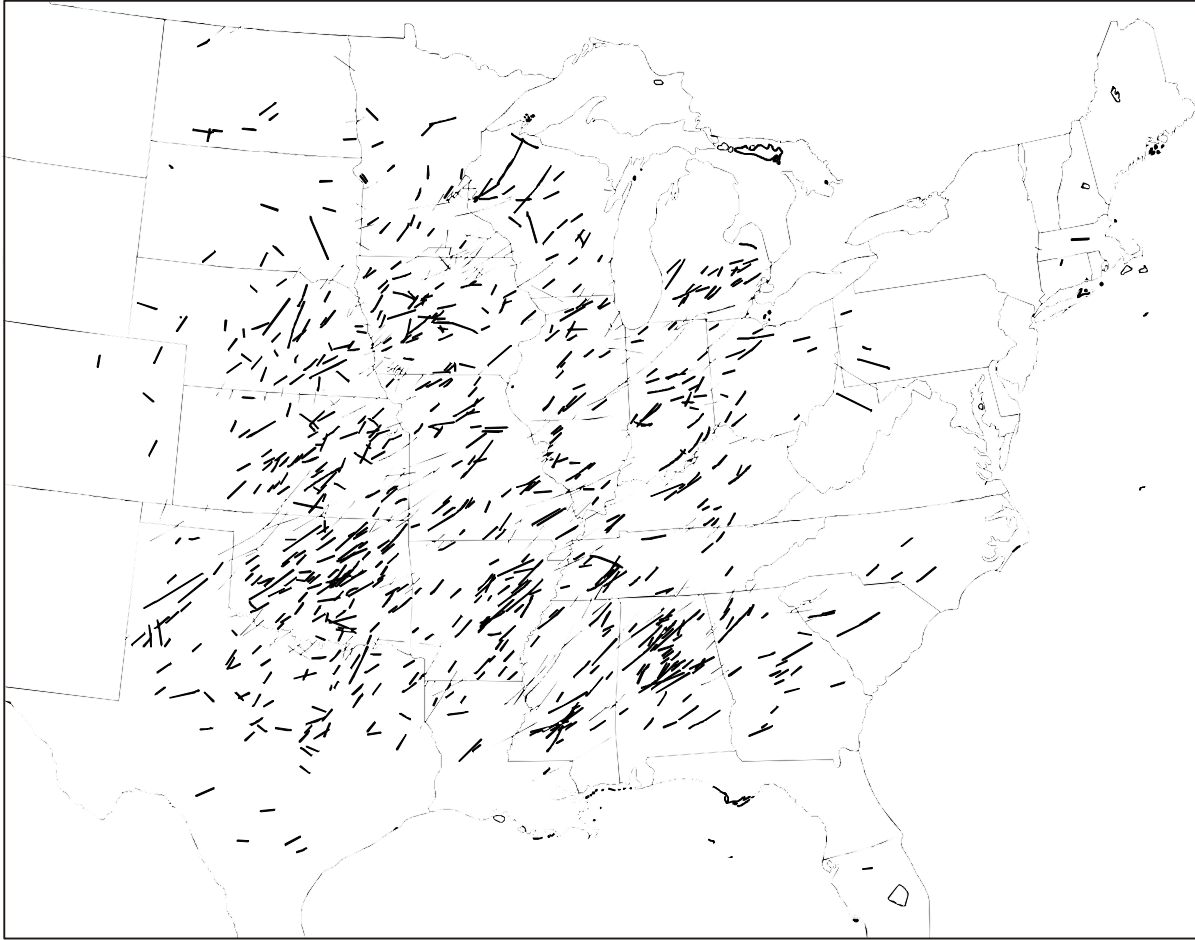


Figura 3-24. Trayectorias de 972 tornados violentos (F4/5) confirmados en los Estados Unidos, 1880–1982
(según Grazulis y Abbey, 1983)

3.9 EFECTOS AERODINÁMICOS NEGATIVOS DE LAS FUERTES LLUVIAS

3.9.1 A juicio de algunos investigadores⁶⁸, en varios accidentes de aviación en que la cizalladura del viento se había considerado como una de las causas contribuyentes (p. ej., el accidente de la Eastern Airlines en el Aeropuerto internacional JFK en 1975), la degradación de la actuación de la aeronave puede explicarse en gran parte por los efectos aerodinámicos negativos resultantes de las fuertes lluvias. Las fuertes lluvias pueden afectar a la actuación de una aeronave por lo menos de los cuatro modos siguientes:

- a) las gotas de lluvia que golpean la aeronave ocasionan en ésta una presión orientada hacia abajo y hacia atrás;
- b) la delgada película de agua formada por la lluvia en la célula aumenta la masa de la aeronave;
- c) esta película de agua que puede hacerse “rugosa” por el efecto de las gotas que siguen cayendo y de las tensiones superficiales, lo cual puede ocasionar efectos negativos en la sustentación/resistencia al avance en relación con una superficie sustentadora seca y lisa; y

- d) según la orientación de la aeronave, las gotas de lluvia que la golpean de manera desigual ocasionan cabeceo.

3.9.2 Después de analizar esta hipótesis mediante una computadora, empleando un modelo hidrodinámico, los investigadores llegaron a las conclusiones siguientes:

- a) los efectos aerodinámicos negativos llegan a ser importantes cuando el índice de precipitación se acerca a 500 mm/h (lluvia sumamente intensa); y
- b) los efectos negativos en lo tocante a la sustentación/resistencia al avance pueden ser muy importantes cuando el índice de precipitación es superior a 100 mm/h (lluvia intensa).

3.9.3 Las simulaciones de aterrizaje indican que la aproximación en presencia de un índice de precipitación de 400 mm/h puede producir una degradación de la actuación de la aeronave equivalente a la que produce una cizalladura del viento de 18 km/h por 30 m (9 kt/100 ft). Además, la combinación de algunos o de todos los antedichos efectos podría aumentar temporalmente la velocidad de pérdida de la aeronave, posiblemente por encima de la velocidad a la cual el sistema advertidor de entrada en pérdida (sacudidor de palanca) debe normalmente funcionar. Aun cuando la magnitud del efecto de intensa precipitación en la performance de la aeronave no ha sido todavía determinada, el Comité sobre cizalladura del viento a baja altitud y sus peligros para la aviación (Estados Unidos) recomienda que se sigan las investigaciones (véase el Apéndice 2).

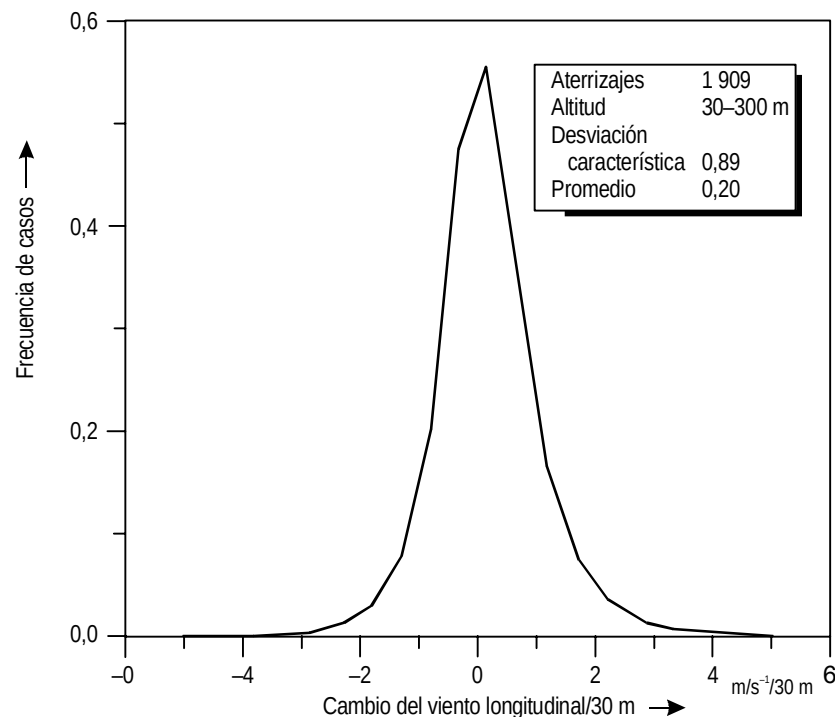


Figura 3-25. Distribución de la densidad de probabilidades de cambio del viento longitudinal/30 m en el Aeropuerto de Schiphol, para alturas comprendidas entre 30 y 300 m, curva basada en los datos obtenidos del sistema AIDS, noviembre 1977-1978 (según Haverdings, 1980, con adaptación por la OACI)

3.9.4 Al margen del debate que se está sosteniendo con respecto a los efectos aerodinámicos negativos de las intensas precipitaciones, ha habido casos en que las aeronaves que habían penetrado violentas tormentas habían sufrido una pérdida total de potencia en todos sus motores. Un ejemplo es el del DC-9 que se estrelló en 1977 mientras efectuaba un aterrizaje de emergencia después de una pérdida total de potencia de los motores en vuelo; la National Transport Safety Board de los Estados Unidos (NTSB) atribuyó esto a la ingestión directa de enormes cantidades de agua y granizo en una violenta tormenta, combinada con un movimiento de la palanca de potencia, lo que ocasionó una considerable pérdida de sustentación e importantes daños en los compresores de los motores.⁶⁹ Se están llevando a cabo investigaciones para evaluar si los álabes de los sensores del ángulo de ataque utilizados en el advertidor de pérdida, los advertidores de cizalladura del viento y las características de transmisión/recepción del radar meteorológico pudieron haber sido afectados por la lluvia. Se ha indicado que los errores pudieron haber sido causados por una alineación parcial de estos álabes en el ángulo que formaba la lluvia que se acercaba, que debería ser del orden de 8° respecto a la horizontal, a las velocidades normales de aproximación de una aeronave.

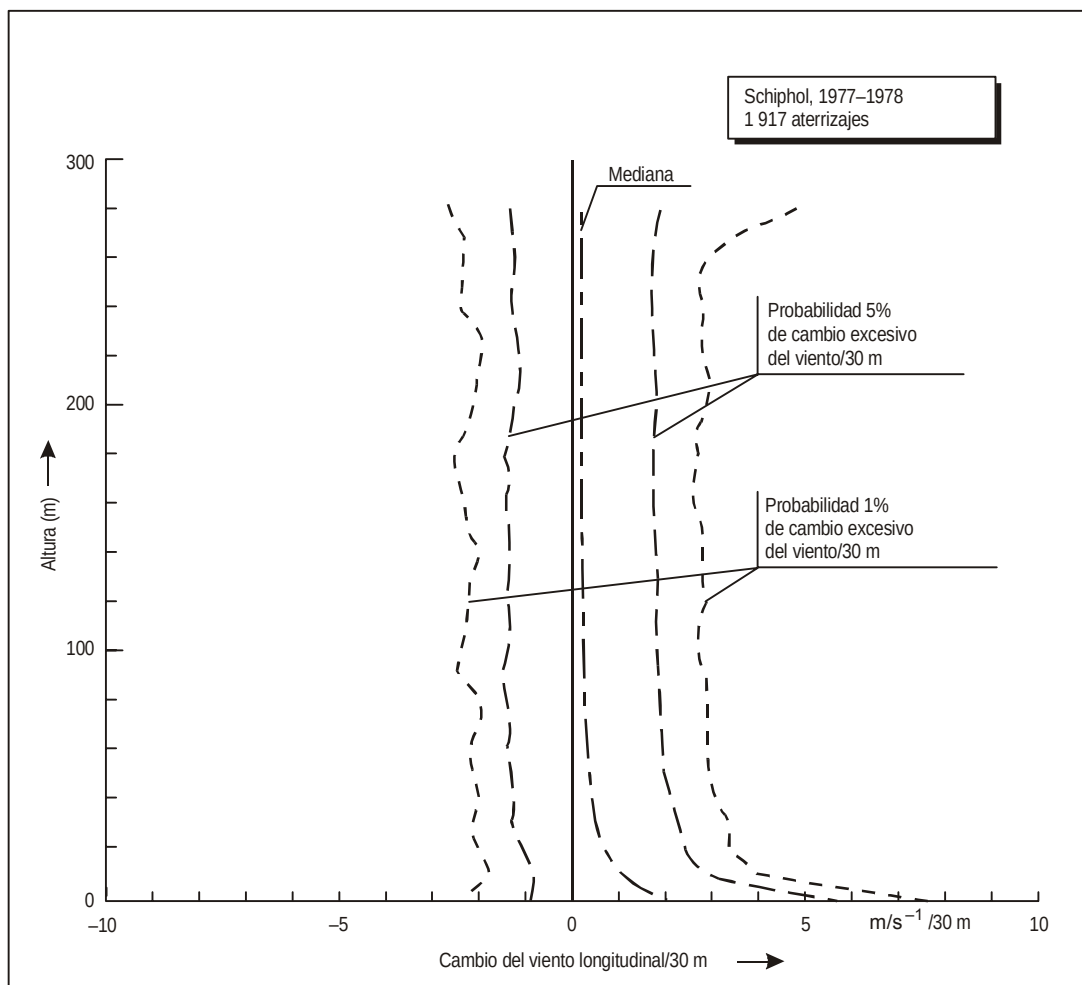


Figura 3-26. Probabilidades de 50%, 5% y 1% de cambio excesivo del viento longitudinal/30 m en el aterrizaje, en función de la altura (según Haverdings, 1980, con adaptación por la OACI)

— — — — —

Referencias

1. Stewart, 1979: The atmospheric boundary layer, Third IMO lecture, WMO No. 523.
2. WMO Technical Note No. 93, 1969: Vertical wind shear in the lower layers of the atmosphere.
3. Ellis and Keenan, 1978: Development of wind shear models and determination of wind shear hazards, FAA Report No. FAA-RD-79-119.
4. André and Mahot, 1982: The nocturnal surface inversion and influence of clear air radiative cooling, *Journal of the Atmospheric Sciences*.
5. Heald and Mahot, 1981: The dependence of boundary layer shear on diurnal variation of stability, *Journal of the Atmospheric Sciences*.
6. Abele, 1982: Diurnal variability of wind velocity increase with height, Los Alamos National Laboratory Research Paper No. LA-9601-MS.
7. Pettersson, 1956: Convective clouds and weather, *Weather Analysis and Forecasting*, Volume 1, 2nd Edition, McGraw Hill.
8. Cole, Allan and Miller, 2000: Vertical wind shear near airports as an aviation hazard, *Preprints, Ninth Conference on Aviation, Range, and Aerospace Meteorology*, Orlando, Florida, American Meteorological Society.
9. Cole, Evans and Rhoda, 1997: Delay reduction due to the integrated terminal weather system (ITWS), terminal winds product, *Preprints, Seventh Conference on Aviation, Range, and Aerospace Meteorology*, Long Beach, California, American Meteorological Society.
10. Joffre, 1984: Power laws and the empirical representation of velocity and directional shear, *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 23, Issue 8.
11. Brooks, 1970: Preliminary study of wind shear in the boundary layer at Melbourne Airport, Meteorology Study No. 19, Australian Bureau of Meteorology.
12. Saissac, et al., 1971: Étude dynamique de la couche 0–100 m, Monographie No. 81 de la Météorologie Nationale, France.
13. McKinley, 1984: Evaluating wind flow around buildings on heliport placement, FAA Report V85-21881.
14. Morrison, 1982: Refresher course, wind shear, *Canadian Aviation*.
15. Bedard and LeFebvre, 1983: Downslope windstorms and negative buoyancy forces, *Preprints, 13th Conference on Severe Local Storms*, Tulsa, Oklahoma, American Meteorological Society.
16. Alaka, 1958: Aviation aspects of mountain waves, WMO Technical Note No. 18.
17. Zipser and Bedard, 1982: Front range windstorms revisited, *Weatherwise*, United States.
18. Smith, Crook and Roff, 1982: The morning glory: An extraordinary undular bore, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*.
19. Smith and Goodfield, 1981: The 1979 morning glory expedition, *Weather*, London.
20. Christie and Muirhead, Solitary waves and low altitude wind shear in Australia, Aviation Safety Digest No. 123/3.
21. Christie and Muirhead, 1983: Solitary waves: A hazard to aircraft operating at low altitudes, *Australian Meteorological Magazine*.

22. Richwien and McLeod, 1978: Low level frontal wind shear forecast test, FAA Report No. FAA-RD-77-184.
23. Badner, 1979: Low-level wind shear: A critical review, NOAA Technical Memorandum No. NWS FCST-23.
24. Wei-Kuo Tao and Simpson, 1984: Cloud interactions and merging: Numerical simulations, *Journal of the Atmospheric Sciences*.
25. Byers and Braham, 1949: The thunderstorm, United States Government Printing Office.
26. Weisman, 1983: An eye to the clouds, *Weatherwise*, United States.
27. Peterson, 1984: A triple Doppler radar analysis of a discretely propagating multicell convective storm, *Journal of the Atmospheric Sciences*.
28. Bennets, McCallum and Grant, 1986: Cumulonimbus clouds: an introductory review, *Meteorological Magazine*, Volume 115, Meteorological Office, London.
29. Rotunno and Klemp, 1985: On the rotation and propagation of simulated supercell thunderstorms, *Journal of the Atmospheric Sciences*.
30. Davies-Jones, 1984: The origin of updraft rotation in supercell storms, *Journal of the Atmospheric Sciences*.
31. Vasiloff, Brandes and Davies-Jones, 1986: An investigation of the transition from multicell to supercell storms, *Journal of Climate and Applied Meteorology*.
32. Srivastava, 1985: A simple model of evaporatively driven downdraft: Application to microburst, *Journal of the Atmospheric Sciences*.
33. Seitter, 1983: Numerical simulation of thunderstorm gust fronts, United States Air Force Geophysics Laboratory, Environmental Research Paper No. 862.
34. Moncrieff, 1986: Comments on nor-wester thunderstorm structure, *Weather*, Royal Meteorological Society, London.
35. Joseph, Raipal and Deka, 1980: Andhi, the convective dust storm of northwest India, *Mausam*, Volume 31, Indian Meteorological Department.
36. Fujita, 1976: Spearhead echo and downburst near the approach end of a JFK Airport runway, New York City, University of Chicago, SMRP Research Paper No. 137.
37. Wolfson, 1983: Doppler radar observations of an Oklahoma downburst, *Preprints, Twenty-first Conference on Radar Meteorology*, Edmonton, Canada, American Meteorological Society.
38. Fujita, 1978: Manual of downburst identification for Project NIMROD, University of Chicago, SMRP Research Paper No. 156.
39. McCarthy and Wilson, 1982: The Joint Airport Studies (JAWS) Project, *Bulletin of the American Meteorological Society*.
40. Fujita and Wakimoto, 1983: Microburst in JAWS depicted by Doppler radars, PAM and aerial photographs, *Preprints, Twenty-first Conference on Radar Meteorology*, Edmonton, Canada, American Meteorological Society.
41. Wilson and Roberts, 1983: Evaluation of Doppler radar for airport wind shear detection, *Preprints, Twenty-first Conference on Radar Meteorology*, Edmonton, Canada, American Meteorological Society.
42. Woodfield and Vaughan, 1983: Airspeed and wind measurements with an airborne CO₂ CW laser, Royal Aircraft Establishment Technical Memorandum.
43. Fujita and Smith, 1985: from Fujita's "The Downburst" SMRP Research Paper No. 210, University of Chicago.

44. Wilson, Roberts, Kessinger and McCarthy, 1984: Microburst wind structure and evaluation of Doppler radar for airport wind shear detection, *Journal of Climate and Applied Meteorology*.
45. McCarthy and Wilson, 1985: The CLAWS project, *Preprints, Second Conference on Aviation Weather Systems*, Montréal, Canada, American Meteorological Society.
46. Stevenson, 1985: The Stapleton microburst advisory service project: The operational viewpoint, United States Department of Transportation, Report No. DOT/FAA/PM-85/21.
47. Fujita, 1981: Tornadoes and downbursts in the context of generalized planetary scales, *Journal of the Atmospheric Sciences*.
48. Snow, 1984: The tornado, *Scientific American*.
49. Snow and Pauley, 1984: On the thermodynamic method for estimating maximum tornado wind speeds, *Journal of Climate and Applied Meteorology*.
50. Wolde-Tinsae, Porter and McKeown, 1985: Windspeed analysis of tornadoes based on structural damage. *Journal of Climate and Applied Meteorology*.
51. Simpson, et al., 1986: Observations and mechanisms of GATE waterspouts, *Journal of the Atmospheric Sciences*.
52. Browning and Foote, 1976: Airflow, and hail growth in supercell storms, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, London.
53. Thorpe, 1981: Thunderstorm dynamics: A challenge to the physicist, *Weather*, Royal Meteorological Society, London.
54. Ellrod, 1985: Indicators of high altitude non-convective turbulence observed in satellite images, *Preprints, Second Conference on Aviation Weather Systems*, Montréal, Canada, American Meteorological Society.
55. World Meteorological Organization, 1953: World distribution of thunderstorm days, Part 2, WMO Publication No. 21, Geneva, Switzerland.
56. Court and Griffiths, 1982: Thunderstorm Climatology, Volume 2, National Oceanic and Atmospheric Administration, United States Department of Commerce.
57. Easterling and Robinson, 1985: The diurnal variation of thunderstorm activity in the United States, *Journal of Climate and Applied Meteorology*.
58. McCarthy and Wilson, 1984: The microburst as a hazard to aviation, 2nd International Nowcasting Symposium, Norrköping, Sweden.
59. Grazulis and Abbey, 1983: 103 years of violent tornadoes, *13th Conference on Severe Local Storms*, Tulsa, Oklahoma, American Meteorological Society.
60. Woodfield and Woods, 1984: World-wide experience of wind shear during 1981–82, Advisory Group for Aerospace Research and Development (AGARD), Conference Proceedings No. 347.
61. Haverdings, 1980: On the use of AIDS data for a statistical analysis of wind shear during the approach, Netherlands National Aerospace Laboratory, Report NLR MP 80008 U.
62. Haverdings, 1981: AIDS-derived wind shear statistics for approach and landing, Netherlands National Aerospace Laboratory, Report NLR TR 81066L.
63. Haverdings, 1984: Wind shear investigation programme at the NLR (in Dutch, English summary), Netherlands National Aerospace Laboratory, Report NLR MP 84027 U.

64. Krauspe, 1984: Wind shear measurement on board an airliner, NASA Technical Memorandum NASA TM-77463.
 65. United States Federal Aviation Administration, 1981: *General Aviation News*.
 66. Woodfield, 1983: Wind shear and wake vortex research in the United Kingdom (1982), NASA Report CP-2274.
 67. Cole, Dasey and Mathews, 1998: Atmospheric profiling to support adaptive wake vortex spacing of aircraft, *4th International Symposium on Tropospheric Profiling: Needs and Technologies*, Snowmass, Colorado.
 68. Luers and Haines, 1981: The effect of heavy rain on wind shear attributed accidents, American Institute of Aeronautics and Astronautics, St. Louis.
 69. Flight Safety Foundation, 1985, and the United States National Transport Safety Board Report No. NTSB-AAR-78-3 (1978).
-

Capítulo 4

EFFECTO DE LA CIZALLADURA DEL VIENTO A POCA ALTURA SOBRE LA ACTUACIÓN DE LA AERONAVE

4.1 GENERALIDADES

4.1.1 Para comprender el efecto que la cizalladura del viento ejerce sobre la actuación de la aeronave, conviene repasar algunos de los principios básicos del vuelo. En la Figura 4-1 se indican las fuerzas principales que actúan sobre una aeronave en vuelo: el empuje de los motores, la masa de la aeronave, la sustentación proporcionada primordialmente por las alas, y la resistencia aerodinámica. Las ilustraciones se han simplificado un poco; por ejemplo, se supone aquí que el empuje se ejerce exactamente en la misma dirección que la trayectoria de vuelo. Esta simplificación permite comprender los principios con mayor facilidad, sin afectar mucho las conclusiones.

4.1.2 Cuando las fuerzas que actúan sobre la aeronave se hallan en equilibrio, en el caso del vuelo uniforme no acelerado, no se produce fuerza resultante alguna y, por consiguiente, la suma de todas las fuerzas de ascenso normales a la dirección de vuelo debe ser igual a la suma de todas las fuerzas de descenso normales a la dirección de vuelo. De modo similar, la suma de todas las fuerzas de avance en la dirección de vuelo debe ser igual a la suma de todas las fuerzas de retroceso en la dirección de vuelo. La aeronave se encuentra entonces en equilibrio y, de acuerdo con la primera ley del movimiento de Newton, continuará en ese estado ya ascienda, descienda o mantenga el vuelo horizontal, hasta tanto se perturbe el equilibrio de fuerzas.

4.1.3 Aunque estas ecuaciones son sencillas, permiten sacar conclusiones importantes. En el vuelo horizontal no acelerado, el empuje tiene que equilibrar la resistencia aerodinámica y la sustentación tiene que equilibrar la masa [Figura 4-1 b)]. En el vuelo ascendente no acelerado, el empuje también tiene que equilibrar parte de la masa ($W \sin \gamma$), de modo que se requiere más empuje que para el vuelo horizontal, siendo el empuje necesario proporcional al ángulo de ascenso. Los ángulos de ascenso posibles pueden calcularse simplificando la ecuación (1) de la Figura 4-1. Para los ángulos de ascenso, que en general son pequeños, $\sin \gamma \approx \gamma$, resultando la ecuación (1):

$$T = D + W\gamma$$

y, de ese modo,

$$\gamma = \frac{T - D}{W}$$

Por consiguiente, el ángulo de ascenso es una función directa del exceso de empuje sobre la resistencia aerodinámica y una función inversa de la masa. En el vuelo descendente no acelerado [Figura 4-1 c)], la ecuación (5) indica que se necesita menos empuje que para el vuelo horizontal debido a que parte de la masa ($W \sin \gamma$) actúa ahora en el mismo sentido que el empuje.

4.1.4 Toda esta información es pertinente en relación con la cizalladura del viento como puede verse al examinar el alcance de cada una de las cuatro fuerzas principales que actúan sobre la aeronave. El peso es simplemente $W = mg$ (masa de la aeronave $\times$ la aceleración de la gravedad); el empuje (T) es la fuerza

directa producida por los motores; la sustentación (L) y la resistencia aerodinámica (D) resultan proporcionales a la densidad del aire (ρ), el área del velamen (S) y al cuadrado de la velocidad del aire sobre las alas (V), o sea que L y D son proporcionales a ρ , S y V^2 . Las constantes de proporcionalidad C_L y C_D , llamadas coeficiente de sustentación y coeficiente de resistencia aerodinámica, que se representan como:

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

y

$$D = \frac{1}{2} C_D \rho S V^2$$

dependen, entre otras variables, del ángulo de ataque (α) del ala. Estas ecuaciones indican que la sustentación y la resistencia aerodinámica dependen del ángulo de ataque (mediante C_L) y del cuadrado de la velocidad relativa, y que la cizalladura del viento puede afectar tanto al ángulo de ataque como a la velocidad relativa, que a su vez influyen sobre la sustentación y la resistencia aerodinámica, que perturban en último término el equilibrio de la aeronave (véase el Apéndice 3).

EFFECTO DE LA CIZALLADURA DEL VIENTO SOBRE LA VELOCIDAD RELATIVA

4.1.5 La aseveración de que “el viento afecta a la velocidad relativa” parece contradecir la regla aprendida en la instrucción básica de pilotaje de que “el viento sólo afecta a la velocidad respecto al suelo y la deriva”.¹ Esta contradicción aparente puede haber causado confusión en la mente de algunos pilotos y quizás contribuyera a que experimentaran dificultades en la comprensión de los graves efectos que puede tener la cizalladura del viento sobre la actuación de la aeronave. Pueden armonizarse las dos afirmaciones introduciendo la palabra “transitorio” en la primera de ellas, de modo que diga “el viento (es decir, el cambio del viento) tiene un efecto transitorio sobre la velocidad relativa” y teniendo en cuenta la estabilidad longitudinal de la aeronave, que trata de recuperar la velocidad relativa original compensada. Esto significa que, en condiciones de viento uniforme o cuando el viento horizontal varía gradualmente, el viento no ejerce efecto alguno sobre la velocidad relativa, por lo cual es verdadera la conocida ecuación:

Velocidad respecto al suelo (GS) = velocidad verdadera (TAS) $\pm$ velocidad del viento a lo largo de la derrota (WIND)

Sin embargo, en condiciones de cizalladura del viento, el viento horizontal (el viento a lo largo de la derrota es el factor importante en esta situación, o sea, el viento que se encuentra de frente o de cola en el aterrizaje o el despegue) no es uniforme ni varía gradualmente, sino que puede cambiar abruptamente en una distancia relativamente corta. Es evidente que si una aeronave se encuentra con un cambio abrupto de viento de frente o de cola, debido a su inercia no puede acelerar ni decelerar instantáneamente para recuperar la velocidad relativa original compensada; durante un período breve y finito, la velocidad relativa varía de acuerdo con la variación del viento. Esta variación “transitoria” de la velocidad relativa altera la sustentación y la resistencia aerodinámica y perturba el equilibrio de las fuerzas que actúan sobre la aeronave. La situación de cambio gradual del viento puede ilustrarse del modo siguiente:

velocidad respecto al suelo 140 kt, sin viento
140 kt (GS) = 140 kt (TAS) – 0 (WIND)

un cambio gradual con viento de frente hasta de 20-kt da por resultado:
120 kt (GS) = 140 kt (TAS) – 20 kt (WIND)

Nota.— En el ejemplo que precede, se ha utilizado la unidad “nudo” (kt) que no pertenece al sistema internacional (SI). De conformidad con el Anexo 5, podría utilizarse en su lugar la unidad correspondiente “kilómetros por hora” (km/h).

La velocidad respecto al suelo se ajusta continuamente al régimen cambiante del viento y no tiene efecto alguno sobre la velocidad relativa. Con todo, la siguiente es una ilustración de la secuencia de sucesos durante un encuentro con un cambio abrupto del viento:²

velocidad respecto al suelo 140 kt sin viento
 $140 \text{ kt (GS)} = 140 \text{ kt (TAS)} - 0 \text{ (WIND)}$

un cizallamiento rápido con viento de frente hasta de 20-kt da por resultado temporalmente

$140 \text{ kt (GS)} = 160 \text{ kt (TAS)} - 20 \text{ kt (WIND)}$

cuando se restablece el equilibrio y se recupera la velocidad relativa compensada (o sea, cuando la aeronave ha decelerado respecto al suelo)

$120 \text{ kt (GS)} = 140 \text{ kt (TAS)} - 20 \text{ kt (WIND)}$

como en el ejemplo anterior.

El modo en que la aeronave restablece el equilibrio sobre la base de su estabilidad longitudinal se trata en 4.1.11 a 4.1.13.

4.1.6 La perturbación del equilibrio de fuerzas que actúan sobre la aeronave crea una fuerza resultante, de modo que en lugar de la ecuación (1), que se escribe $T = D + W \sin \gamma$ o $T - D - W \sin \gamma = 0$ (o sea, sen fuerza resultante), una vez que se ha perturbado el equilibrio, la ecuación debe escribirse $T - D - W \sin \gamma = F$ (fuerza resultante) y la aplicación de una fuerza resultante a la aeronave causa inmediatamente una aceleración. Esta se debe a la segunda ley del movimiento de Newton, que dice que “la rapidez de modificación de la cantidad de movimiento de un cuerpo es proporcional a la fuerza que actúa sobre el cuerpo, en dirección de la fuerza aplicada”. Esta ley se expresa comúnmente como:

$$F = ma \text{ (masa} \times \text{aceleración)} \text{ o } F = \frac{W}{g} a$$

Bajo el efecto transitorio de la cizalladura del viento cuando se perturba el equilibrio, las ecuaciones (1) a (6) deberían escribirse del modo siguiente:³

$$\left. \begin{array}{l} \text{(ascenso)} \quad T - D - W \sin \gamma \\ \text{(vuelo horizontal)} \quad T - D \\ \text{(descenso)} \quad T + W \sin \gamma - D \end{array} \right\} = \frac{W}{g} \cdot \text{aceleración a lo largo de la trayectoria de vuelo}$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{(ascenso/descenso)} \quad L - W \cos \gamma \\ \text{(vuelo horizontal)} \quad L - W \end{array} \right\} = \frac{W}{g} \cdot \text{aceleración a lo largo de la trayectoria de vuelo}$$

La aeronave acelera en la dirección **en la cual actúa la fuerza perturbadora (resultante)** hasta que se vuelve a lograr el equilibrio. En la parte en negrilla se realiza el hecho de que, aunque el equilibrio se restablece, la aeronave no puede evitar de volar en una nueva trayectoria y, de acuerdo con la primera ley del movimiento de Newton, permanecerá en la nueva trayectoria de vuelo hasta que el equilibrio se perturbe nuevamente. La aeronave busca siempre una trayectoria de vuelo que dará como resultado el equilibrio entre las fuerzas que actúan sobre ella. En otras palabras, la cizalladura del viento modifica la trayectoria de vuelo de la aeronave y, para que ésta vuelva a la trayectoria de vuelo prevista, el piloto tiene que intervenir. Los cambios iniciales en la trayectoria de vuelo debidos a los cambios transitorios de la velocidad relativa, causados por la cizalladura del viento, se indican en la Figura 4-2. Estos efectos son producidos por los cizallamientos en el viento horizontal como los que podrían encontrarse en los perfiles de vientos fuertes próximos al suelo (especialmente corrientes en chorro a bajo nivel), sistemas frontales, etc.

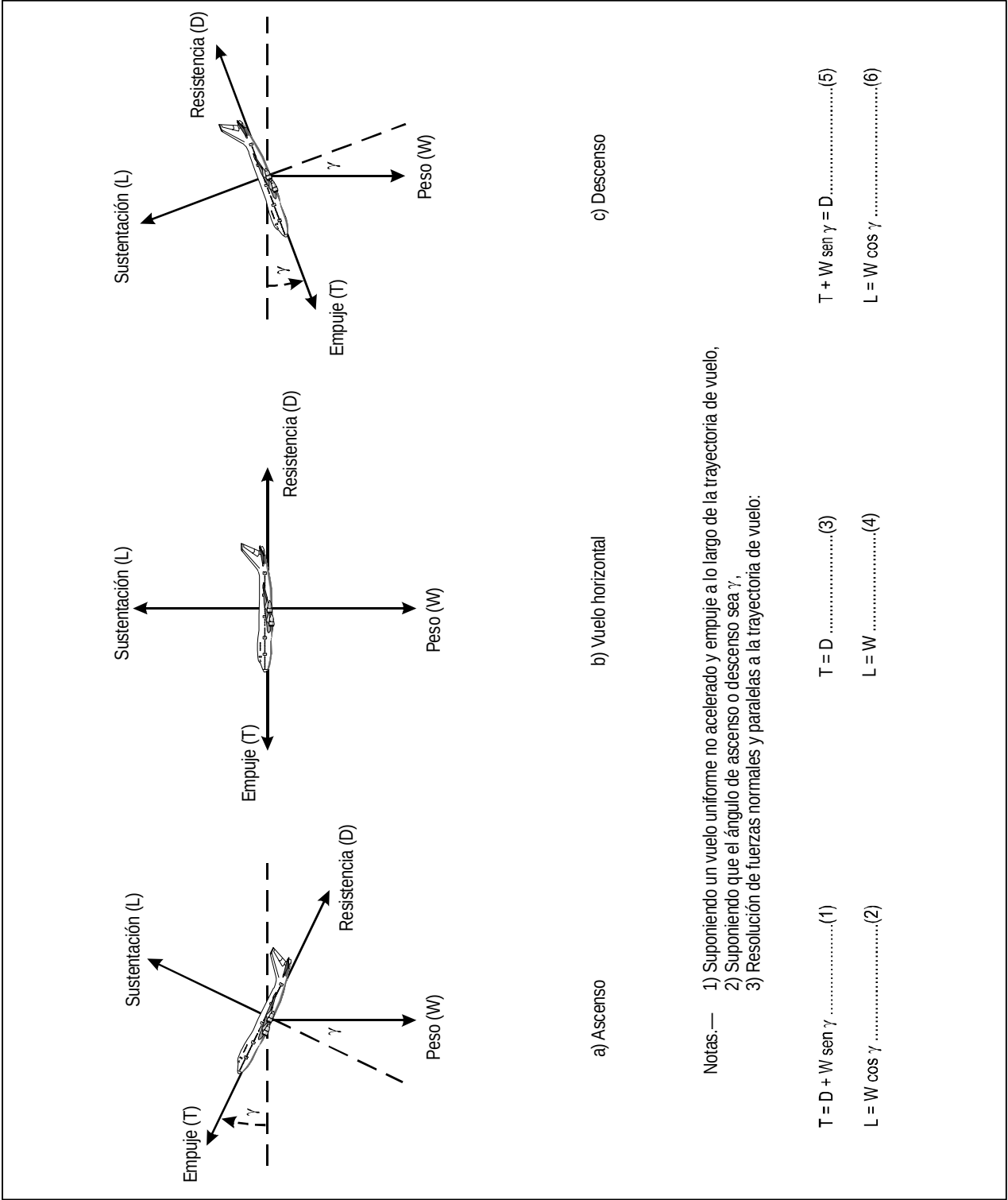


Figura 4-1. Fuerzas que actúan sobre la aeronave en vuelo

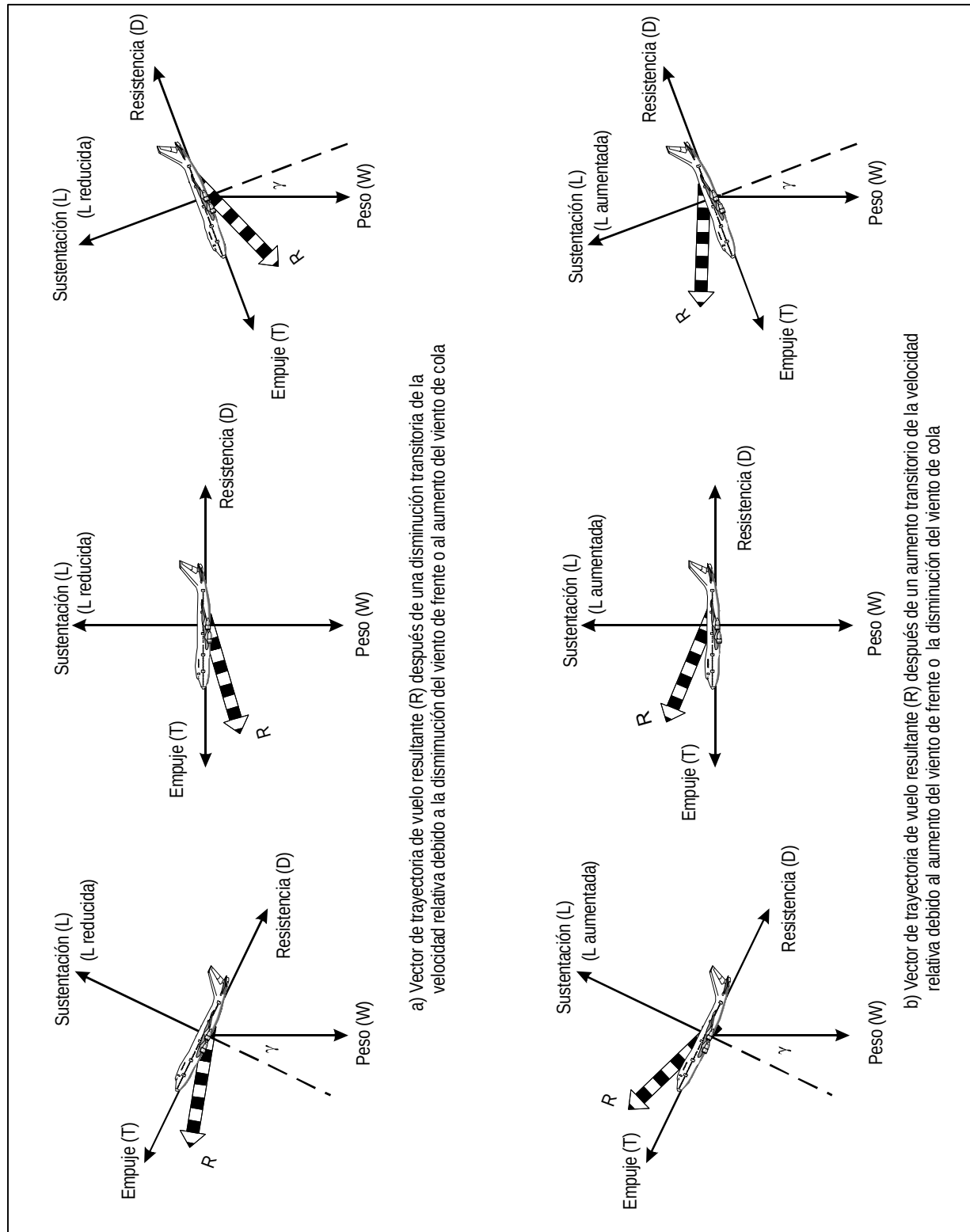


Figura 4-2. Vector de la trayectoria de vuelo resultante debido a cizalladura del viento horizontal

Nota.— En cuanto al efecto transitorio de la cizalladura del viento sobre la velocidad relativa, un viento de frente en disminución tiene exactamente el mismo efecto transitorio sobre la velocidad relativa (disminución) que un viento de cola en aumento. De modo similar, un viento de frente en aumento tiene exactamente el mismo efecto transitorio sobre la velocidad relativa (aumento) que un viento de cola en disminución. Otras consideraciones se aplican, una vez restablecido el equilibrio, particularmente para una aeronave que aterriza, punto que se analiza en 4.2.6.

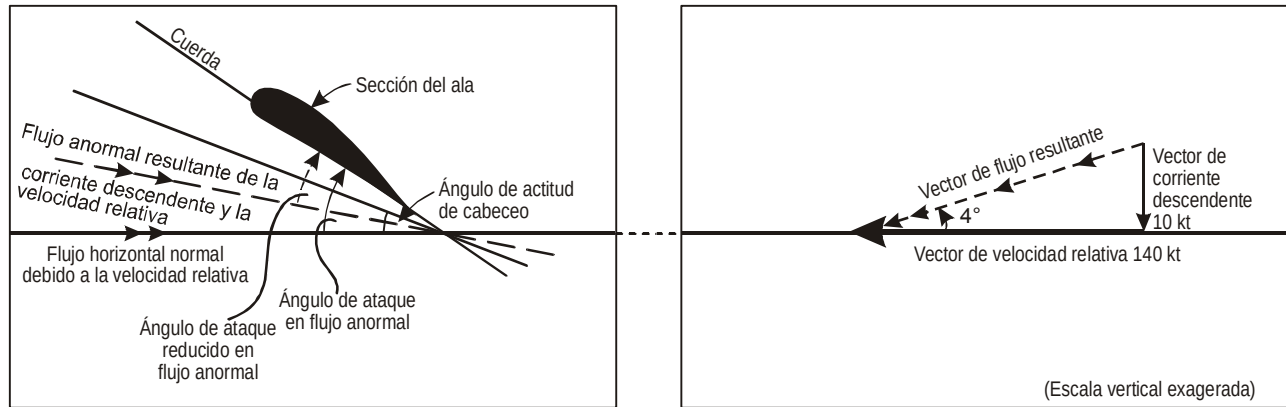
EFFECTO DE LA CIZALLADURA DEL VIENTO SOBRE EL ÁNGULO DE ATAQUE

4.1.7 En 4.1.4 se estableció que la cizalladura del viento puede afectar al ángulo de ataque. En el párrafo 2.1.1 se analizaron casos especiales en la atmósfera, en los cuales la componente vertical del viento no es cero (ni muy pequeña) y que puede llegar a predominar sobre las componentes de viento de frente o de cola y viento de costado. Estos casos comprenden las ondas orográficas y especialmente las corrientes descendentes asociadas con las nubes convectivas (véanse 3.2.8 y 3.5.11 a 3.5.14, respectivamente). En los párrafos 4.1.8 y 4.1.9 se concentrará en el efecto de la cizalladura del viento de las corrientes descendentes porque representan indudablemente el peligro más grave de la cizalladura del viento, aunque los principios se aplican asimismo a cualquier situación en la cual la componente vertical del viento predomina sobre las componentes horizontales y cambia rápidamente.

4.1.8 En vuelo horizontal (sin virajes), una aeronave vuela en una actitud de cabeceo que presenta un ángulo de ataque (α) del ala, apropiado para la velocidad relativa. La relación entre el ángulo de ataque y la velocidad relativa supone que el aire choca con el borde de ataque del ala en sentido horizontal (o sea, con una componente despreciable hacia arriba o hacia abajo) y, generalmente, éste es el caso más frecuente. Sin embargo, si una aeronave volara en una corriente descendente o ascendente, el aire no incidirá horizontalmente sobre el ala, sino que formará un pequeño ángulo con la horizontal, que depende de las magnitudes relativas de la velocidad relativa y de la componente vertical del viento (corriente descendente o ascendente). De este modo, el ángulo de ataque se habrá modificado realmente, sin que se produzca ningún cambio en la actitud de cabeceo.⁴ En la Figura 4-3 se indica el modo en que la corriente descendente reduce el ángulo de ataque, mientras que el ángulo de actitud de cabeceo permanece invariable. El ejemplo que se ofrece es el de una corriente descendente de 5 m/s (1 000 ft/min) y una aeronave con una velocidad relativa de 280 km/h (140 kt) que reduce su ángulo de ataque en unos 4°, sin cambio alguno en la actitud de cabeceo.

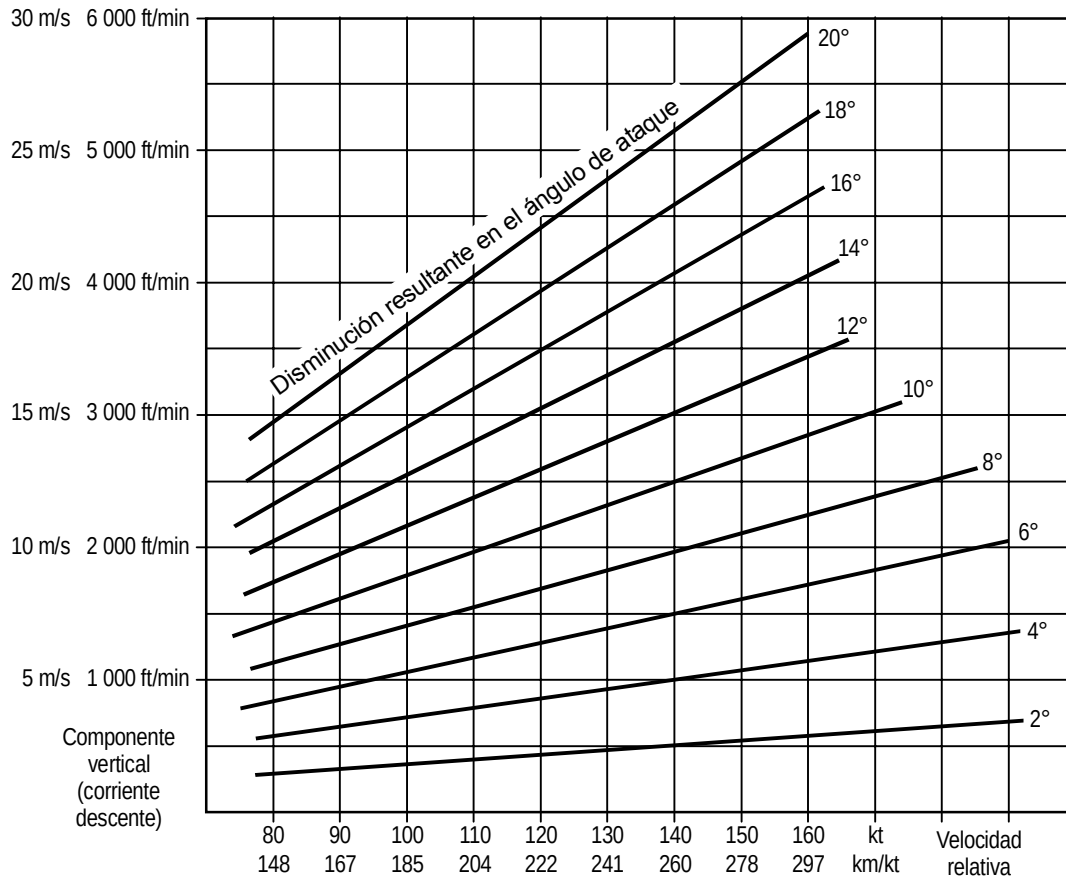
Nota.— Aunque las velocidades de 5 m/s (1 000 ft/min) son probablemente bastante típicas de la mayoría de las corrientes descendentes, en las tormentas fuertes se han medido velocidades máximas superiores a los 25 m/s (5 000 ft/min).

4.1.9 Como en el caso de una variación en la velocidad relativa causada por la cizalladura del viento, tratado en 4.1.5, una variación en el ángulo de ataque debida a una corriente descendente o ascendente es una variación transitoria hasta la recuperación del ángulo de ataque original por la estabilidad longitudinal de la aeronave. Una corriente descendente causa una reducción transitoria del ángulo de ataque, lo que a su vez causa una reducción del coeficiente de sustentación y perturba el equilibrio de las fuerzas que actúan sobre la aeronave, generando así una fuerza resultante que actúa por debajo de la trayectoria de vuelo prevista (véase la Figura 4-4). La corriente descendente actúa en el sentido opuesto. Por consiguiente, una corriente descendente tiene el mismo efecto inicial sobre una aeronave que un viento de frente en disminución o un viento de cola en aumento y una corriente ascendente tiene el mismo efecto inicial que un viento de frente en aumento o un viento de cola en disminución. Con todo, el efecto de la corriente descendente o ascendente se debe a una variación transitoria del ángulo de ataque, mientras que el efecto del viento de frente o de cola se debe a una variación transitoria en la velocidad relativa. El equilibrio se restablece mediante la estabilidad longitudinal después de la perturbación, aunque la aeronave se encontrará volando en una nueva trayectoria. Una vez restablecido el equilibrio, se aplican otras consideraciones, como se indica en 4.2.6.



a) Ángulo de ataque reducido debido a la corriente descendente, aunque el ángulo de actitud de cabeceo permanece invariable

b) Reducción del ángulo de ataque en 4° debido a una corriente descendente de 10 kt a una velocidad relativa de 140 kt



c) Reducción del ángulo de ataque resultante de varias combinaciones de velocidad relativa y componente vertical del viento (corriente descendente)

Figura 4-3. Reducción del ángulo de ataque debido a una corriente descendente de borde agudo

EFFECTO DE LA CIZALLADURA DE VIENTO LATERAL

4.1.10 Hasta ahora la consideración de la cizalladura se ha restringido a las componentes del viento de frente o de cola y a su efecto sobre la velocidad relativa y la cizalladura de las componentes verticales del viento (corriente descendente o ascendente) y asimismo a su efecto sobre el ángulo de ataque. Como se mencionó en 2.1.3, debido a que las pistas están orientadas, en lo posible, en la dirección de la componente menor de viento lateral, la cizalladura en las componentes de viento de frente o de cola y los casos especiales de cizalladura en las componentes verticales del viento (p. ej., corrientes descendentes) tienden a preponderar en las discusiones sobre cizalladura del viento. Esto no significa que no haya cizalladura de la componente de viento lateral ni que su efecto sobre la aeronave sea nulo. En realidad, casi siempre se encuentra cierta cizalladura de la componente de viento lateral, aunque, en general, no afecta a la velocidad relativa ni al ángulo de ataque y, por consiguiente, no modifica el equilibrio de fuerzas sobre la aeronave en el plano vertical. En cambio, afecta a los ángulos de deriva y de derrape, aumentando las complicaciones para el piloto en una situación ya compleja; algunas de estas complicaciones se analizan en 4.2.8.

RESTAURACIÓN DEL EQUILIBRIO DEBIDO A LA ESTABILIDAD LONGITUDINAL

4.1.11 Es necesario considerar el modo en que la aeronave recupera las condiciones de equilibrio después de una perturbación que podría causar la cizalladura del viento. El efecto de recuperación corresponde a la estabilidad de la aeronave, o sea, su capacidad para volver a una condición de vuelo dada después de sufrir una ligera perturbación de esa condición. La aeronave se ha proyectado para que tenga estabilidad en los tres ejes (cabeceo, balanceo y guiñada). En una perturbación debida a cizalladura del viento, reviste particular interés la estabilidad sobre el eje de cabeceo, o sea la estabilidad longitudinal. Ésta asegura que, si varía el ángulo de ataque, las fuerzas de recuperación comenzarán a actuar de modo inmediato y automático para que el ángulo de ataque recupere su valor original.⁵ (El análisis detallado de estas fuerzas es una cuestión sumamente compleja que no se tratará aquí.) En lo tocante a la estabilidad longitudinal, las fuerzas de recuperación provienen principalmente del estabilizador horizontal. Para las condiciones de vuelo particulares de interés (vuelo horizontal, ascenso o descenso, o sea, esencialmente vuelos sin virajes), a cada ángulo de ataque corresponde una velocidad relativa indicada equivalente, por lo cual la aeronave posee también estabilidad “en velocidad”. Esto significa que una aeronave en general cabeceará hacia abajo y acelerará para recuperar la velocidad relativa perdida y que cabeceará hacia arriba y decelerará para suprimir el aumento de velocidad relativa (o sea, recuperar la velocidad relativa primitivamente establecida).

4.1.12 Las respuestas “naturales” de una aeronave a las variaciones del viento se indican usualmente en los textos comunes para el caso de una aeronave con mandos fijos. En estas circunstancias, los cambios de la velocidad relativa producen una oscilación ligeramente amortiguada en la velocidad relativa y en la altura que se llama un fugoide^a con un período de oscilación de unos 40 segundos. Si la oscilación fugoide no se controlara, la aeronave no volaría satisfactoriamente a baja velocidad, como en el despegue y en el aterrizaje, sino que se comportaría del modo irregular que se observa con frecuencia en los avioncitos de papel. Por fortuna, el período de oscilación fugoide es muy largo, por lo cual el piloto puede controlarlo normalmente manteniendo una actitud de cabeceo continua. Las variaciones en el ángulo de ataque, por ejemplo las provenientes de corrientes descendentes o ascendentes producen una oscilación bien amortiguada en cabeceo, con un período de unos cinco segundos, que suele llamarse oscilación de período corto (véase la Figura 4-3).

a. El término “fugoide” poco usual, fue creado por Frederick Lanchester, especialista inglés en aerodinámica a principios del siglo XX, a partir de dos palabras griegas que significan literalmente “tipo fugaz”; lamentablemente, utilizó la palabra griega correspondiente a “vuelo” como “fuga” y no como “vuelo de un pájaro”, que era su intención.

4.1.13 Si el piloto mantiene fija la actitud de cabeceo, la respuesta de la aeronave a la variación en velocidad relativa es un regreso no oscilatorio a la velocidad original (estabilidad en velocidad). Una vez más, bajo control del piloto la respuesta a una corriente descendente o ascendente representa igualmente un regreso no oscilatorio al ángulo de ataque original. El grado de estabilidad en velocidad depende de la cercanía de la velocidad original a la velocidad con potencia mínima a la cual se presenta estabilidad neutra en velocidad. Las velocidades típicas de despegue y aterrizaje están próximas a las velocidades con potencia mínima en las posiciones normales de flaps y tren de aterrizaje. En estas circunstancias la estabilidad en velocidad es baja y las variaciones de la velocidad relativa causada por la cizalladura del viento persistirán a menos que el piloto las corrija accionando los mandos de gases o de cabeceo.

4.2 ACTUACIÓN DE LA AERONAVE EN CONDICIONES PARTICULARES DE CIZALLADURA DEL VIENTO

GENERALIDADES

4.2.1 En la presente sección y en las siguientes, la teoría MET y aerodinámica tratada hasta ahora se aplica a situaciones prácticas con condiciones de cizalladura del viento particulares y a técnicas recomendadas para los pilotos en caso de un encuentro por inadvertencia con las mismas. Se observará que la conclusión que surge es que, en lo posible, debe evitarse un encuentro con cizalladura del viento. Se dedica mucho tiempo para analizar en detalle el fenómeno y su efecto en la aeronave a fin de asistir a los meteorólogos aeronáuticos y proporcionar una base sólida para asistir a los pilotos a fin de que reconozcan y eviten las situaciones posibles de cizalladura del viento. Al conocer la gama de tipos e intensidades de esta última que se han registrado, el piloto adquiere un respeto saludable para dicho fenómeno. Al conocer la respuesta de la aeronave ante la cizalladura del viento, el piloto puede entender más fácilmente lo que sucede; dicho conocimiento explica los motivos de las técnicas recomendadas para un encuentro por inadvertencia con cizalladura del viento, algunas de las cuales pueden aparecer diferentes a las prácticas “normales” de vuelo. En consecuencia, es preciso tener presente que las discusiones siguientes no persiguen el propósito de alentar a los pilotos en el sentido de que intenten volar en condiciones de cizalladura del viento conocida o sospechada; por el contrario, el consejo primordial consiste en EVITAR, EVITAR y EVITAR.

CIZALLADURA DEL VIENTO DE FRENTE O DE COLA

4.2.2 Las situaciones en las cuales podrían encontrarse cerca del suelo cizalladuras del viento de frente o de cola (o sea, componentes del viento de frente o de cola normalmente en relación con la orientación de la pista) comprenden el aterrizaje o el despegue con gradientes de viento fuertes (especialmente las corrientes en chorro a bajo nivel), por superficies frontales y en la proximidad de tormentas. El efecto sobre la aeronave de las cizalladuras del viento asociadas con las tormentas, tales como las que podrían ser causadas por frentes de ráfaga y ráfagas descendentes, se trata en 4.2.9 a 4.2.13 ya que comprende cizalladura en la componente vertical del viento (corriente descendente o ascendente), además de la cizalladura del viento de frente o de cola. La cizalladura asociada con gradientes (o perfiles) del viento a poca altura y superficies frontales, se describe en 3.1 y 3.3, respectivamente. Puede considerarse que una superficie frontal es un caso especial de perfil del viento en lo tocante a sus efectos sobre una aeronave. Los perfiles del viento varían considerablemente con respecto a la rapidez de variación de la velocidad del viento con la altura (medida, por ejemplo, en kt/100 ft) y a la magnitud total de la variación de la velocidad del viento (medida, por ejemplo, en nudos), desde la parte superior del estrato a la inferior. En general, la cizalladura del viento solo representa un problema cuando ambas características son significativas.

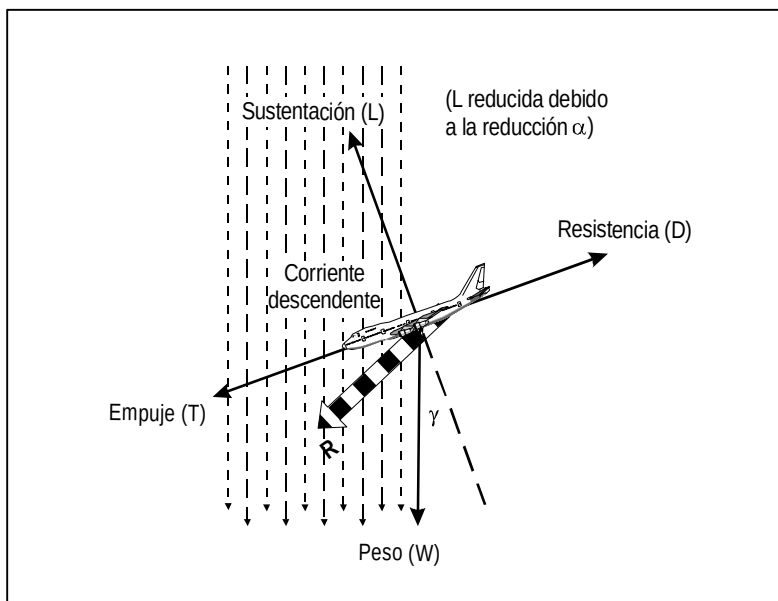


Figura 4-4. Vector resultante de la trayectoria de vuelo debido a cizalladura en la componente vertical del viento (corriente descendente) — corriente descendente hipotética continua y de bordes agudos

Nota.— Las dos características del estrato de cizalladura, o sea, la intensidad (rapidez de variación de la velocidad del viento con la altura) y la variación total en la velocidad del viento, reflejan el estado de la atmósfera en un momento y en un lugar determinados y existen con independencia de la aeronave. Ambas influyen en el aterrizaje o el despegue, pero el efecto depende asimismo de la rapidez con que la aeronave transite por el estrato de cizalladura, o sea, la velocidad del encuentro medida, p. ej., en nudos por segundo.⁶

4.2.3 En el ejemplo que se indica en 2.4.3, la intensidad de la cizalladura del viento es de 8,4 km/h por 30 m (4,2 kt/100 ft) y la velocidad de descenso de la aeronave es de 3,9 m/s (13 ft/s); con lo cual el viento encontrado por esta aeronave tendrá una deceleración de $\frac{4,2 \times 13}{100} = 0,546$ kt por cada segundo.⁷

Las variaciones aproximadas en la velocidad relativa con diferentes intensidades de cizalladura del viento y diferentes velocidades de descenso de la aeronave en una pendiente de planeo de 3°, se indican en la Figura 4-5. La cizalladura total del viento sobre el estrato en este ejemplo, de 300 m (1 000 ft) AGL a 150 m (500 ft) AGL es de 42 km/h (21 kt); si se supone que haya una variación del viento de frente en relación con la orientación de la pista, para una aeronave que aterriza la cizalladura causaría una deceleración en la velocidad relativa de 42 km/h (21 kt) a un ritmo de 1,09 km/h por s (0,546 kt/s). Es necesario especificar la fase de la operación, debido a que el mismo gradiente del viento tiene efectos opuestos en el despegue y el aterrizaje. En el ejemplo citado anteriormente, el viento de frente disminuye a lo largo de la pendiente de planeo para una aeronave que aterriza, pero aumenta a lo largo de la trayectoria de ascenso para una aeronave que despegue (véase 2.3.2).

4.2.4 En el caso de una aeronave que aterrice con viento de frente que disminuye rápidamente o un viento de cola que aumenta rápidamente, la velocidad relativa decelera aproximadamente al mismo ritmo que la deceleración del viento de frente o la aceleración del viento de cola. Como se indica en la Figura 4-2 a), esto hace que la aeronave vuele por debajo de la pendiente de planeo. El nuevo ángulo de descenso establecido debido al desequilibrio transitorio de las fuerzas que actúan sobre la aeronave, se mantendrá mientras continúe la cizalladura y la velocidad permanezca invariable y el piloto no intervenga. El aterrizaje

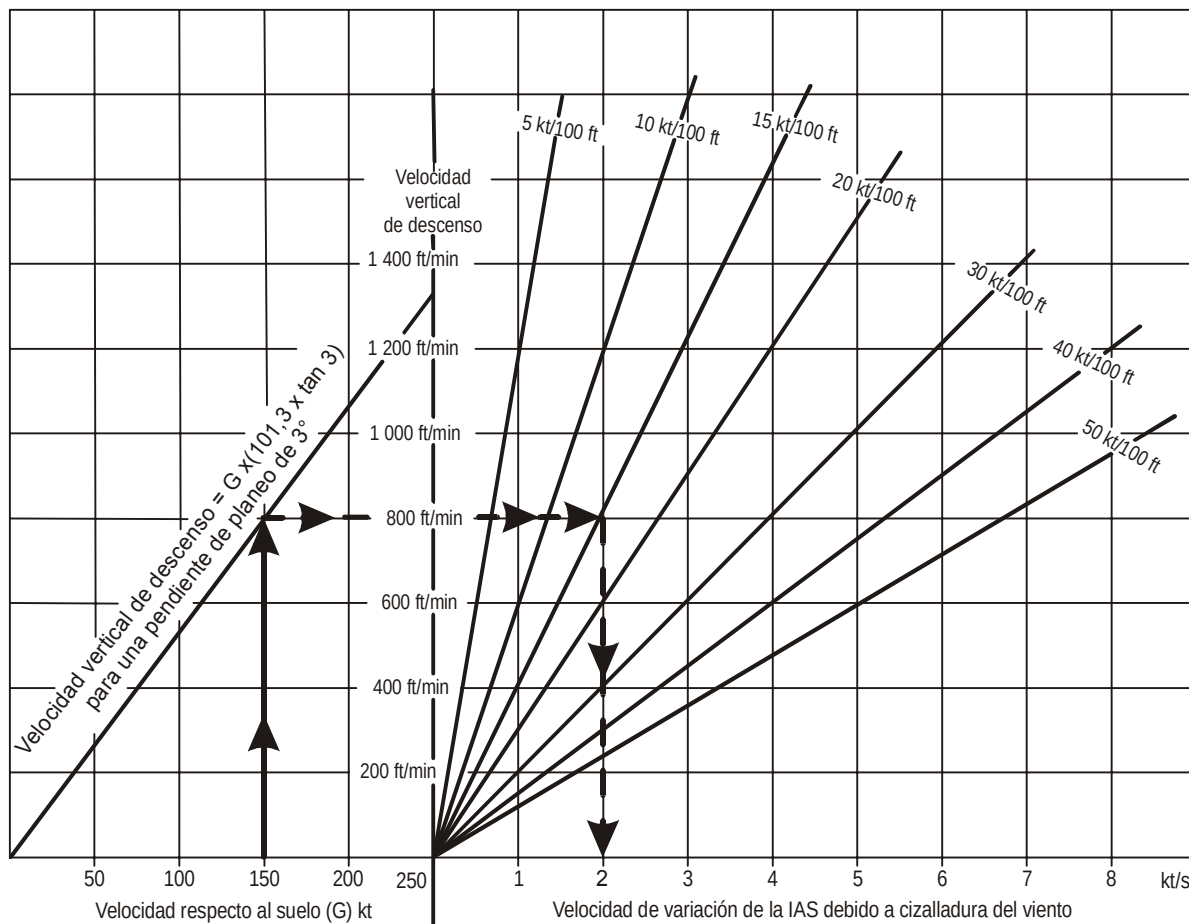


Figura 4-5. Velocidad de variación de la IAS debido a la cizalladura del viento y la velocidad de descenso de la aeronave
(según Lord, 1978, con adaptación por la OACI)

con viento de frente en aumento o viento de cola en disminución causa una aceleración en la velocidad relativa equivalente a la velocidad de la cizalladura y, en consecuencia, la aeronave vuela por encima de la pendiente de planeo. Ambos efectos son muy similares a lo que sucedería si los motores repentinamente perdieran o ganaran, respectivamente, la magnitud equivalente de empuje suficiente para establecer el nuevo ángulo de descenso por debajo o por encima de la pendiente de planeo. Se dice entonces que la trayectoria de vuelo “mejora” si la aeronave pasa por encima de la trayectoria real (o prevista) sin cizalladura y que “se deteriora” si pasa por debajo de la trayectoria de vuelo sin cizalladura. Con todo, no es seguro que una desviación respecto a la trayectoria de planeo pueda considerarse como trayectoria de vuelo “mejorada”. Otros modos de describir los mismos efectos son el aumento de la cizalladura sobre la actuación (viento de frente en aumento, viento de cola en disminución) y la disminución de la cizalladura sobre la actuación (viento de frente en disminución, viento de cola en aumento).

4.2.5 Desde el punto de vista del piloto, la secuencia efectiva de acontecimientos que podría observarse, con los instrumentos del puesto de pilotaje, depende en gran medida de la combinación especial de circunstancias que comprendan la propia cizalladura, la altura de comienzo de la cizalladura sobre el terreno, la configuración de la aeronave y las medidas del piloto. Sin embargo, la secuencia de acontecimientos es relativamente directa si se considera la respuesta de la aeronave con mandos fijos. Con estas limitaciones, la secuencia es la variación de la velocidad relativa que se presenta inmediatamente al

comenzar la cizalladura, seguida de perfiles divergentes de altitud y de cabeceo, como se indica en las Figuras 4-6 y 4-7. En situaciones de viento de frente en disminución (o viento de cola en aumento), la reacción de la aeronave (debida a la estabilidad longitudinal) y la reacción natural del piloto ante la disminución de la velocidad relativa consiste en cabecear para recuperar la velocidad relativa perdida. Sin embargo, durante el aterrizaje y el despegue, el factor crítico es el empeoramiento de la trayectoria de vuelo tan cerca del suelo y de los obstáculos y no la velocidad relativa, en tanto esta última permanezca suficientemente por encima de la velocidad de pérdida.

4.2.6 Las técnicas recomendadas para utilización por parte de los pilotos para controlar la trayectoria de vuelo se tratan en 4.3; sin embargo, es necesario examinar primero el razonamiento que sirve de base para las técnicas utilizadas en determinadas situaciones de cizalladura del viento. El piloto utiliza el timón de profundidad (actitud de cabeceo y por ende ángulo de ataque) y los mandos de empuje para modificar la velocidad y la altura de la aeronave y, en consecuencia, la velocidad de ascenso o descenso. Estos son los medios principales por los cuales el piloto puede controlar la trayectoria de la aeronave cuando se encuentra por inadvertencia con cizalladura del viento. Los efectos de los mandos de profundidad y empuje en la aeronave son interdependientes, por lo que no es posible establecer el efecto cuando se modifica un mando sin especificar asimismo la medida adoptada con el otro mando. Un aumento del empuje tiene como consecuencia una aceleración hacia adelante, que, en función del mando del timón de profundidad, puede proporcionar una velocidad ascensional o una aceleración (aumento de la velocidad relativa) o una combinación de ambas. Como se explicó en 4.2.2 y 4.2.3, para una aeronave, una de las características importantes de la cizalladura del viento es la velocidad del encuentro. En el caso de la cizalladura del viento en disminución, si el piloto puede acelerar la aeronave aumentando el empuje al mismo ritmo en que la aeronave decelera, puede compensarse la cizalladura. Una posibilidad de aceleración típica para una aeronave de transporte de reacción en configuración de aterrizaje con todos los motores en marcha es de 6 km/h por s (3 kt/s) (0,1375 g), lo cual significa que podría mantener el vuelo horizontal con una velocidad relativa constante ante una cizalladura del viento en disminución de 6 km/h por s (3 kt/s). Sin embargo, debería observarse que la intensidad de la cizalladura del viento puede ser superior a esta capacidad. Si varía la velocidad de la cizalladura, debe variar asimismo la aplicación del empuje. Esto presenta una complicación adicional debido a que si la cizalladura cesara por encima del nivel del suelo durante el aterrizaje, o sea, si el viento permaneciera constante con la altura desde la parte inferior del estrato de la cizalladura hasta la toma de contacto con el suelo, la aeronave aterriza con viento constante, por lo cual la variación del empuje necesario al salir de la capa de cizalladura para permanecer en la pendiente de planeo dependerá de que el viento hasta la toma de contacto sople de frente o de cola. El viento relativo experimentado por una aeronave que aterrice en diferentes condiciones de viento estable se indica en la Figura 4-8. Se indica que, al aterrizar con viento de frente o de cola, el ángulo de ataque y la velocidad del viento relativo varían en comparación con las condiciones del aire en calma. El piloto ajusta en consecuencia el empuje y la actitud de cabeceo para permanecer en la pendiente de planeo. Con el viento de frente, la aeronave se encuentra en una actitud de cabeceo más pronunciada, un ángulo de trayectoria de vuelo menos pronunciado y una velocidad vertical inferior que en caso de ausencia de viento, por lo cual se requiere un nivel de empuje mayor para volar en la trayectoria de planeo. En cambio, al aterrizar con viento de cola, la aeronave se halla con una actitud de cabeceo más baja, un ángulo de trayectoria de vuelo más pronunciado y una velocidad vertical mayor que en caso de ausencia de viento y se requiere menos empuje para mantenerse en la pendiente de planeo.²

4.2.7 Aparte de utilizar el empuje para controlar la trayectoria de vuelo, el piloto puede utilizar el control de cabeceo para modificar el ángulo de ataque, lo que le permite compensar entre energía potencial (altura) y energía cinética (velocidad) y viceversa.⁴ Se puede ganar velocidad y perder altura haciendo cabecear la aeronave, con lo cual se logrará aceleración pero se volará a menos altura y se puede ganar altura y perder velocidad encabritando la aeronave, por lo cual se decelerará pero se volará a una altura mayor. Por supuesto, esta es una operación única, ya que la aeronave, en cualquier momento dado, posee una cantidad de energía finita que comprende la energía potencial (en función de la altura) más la energía cinética (en función de la velocidad). La compensación de una por otra no modifica la energía total. En cambio, un aumento o una disminución en el empuje modifica la energía total y tiene un efecto

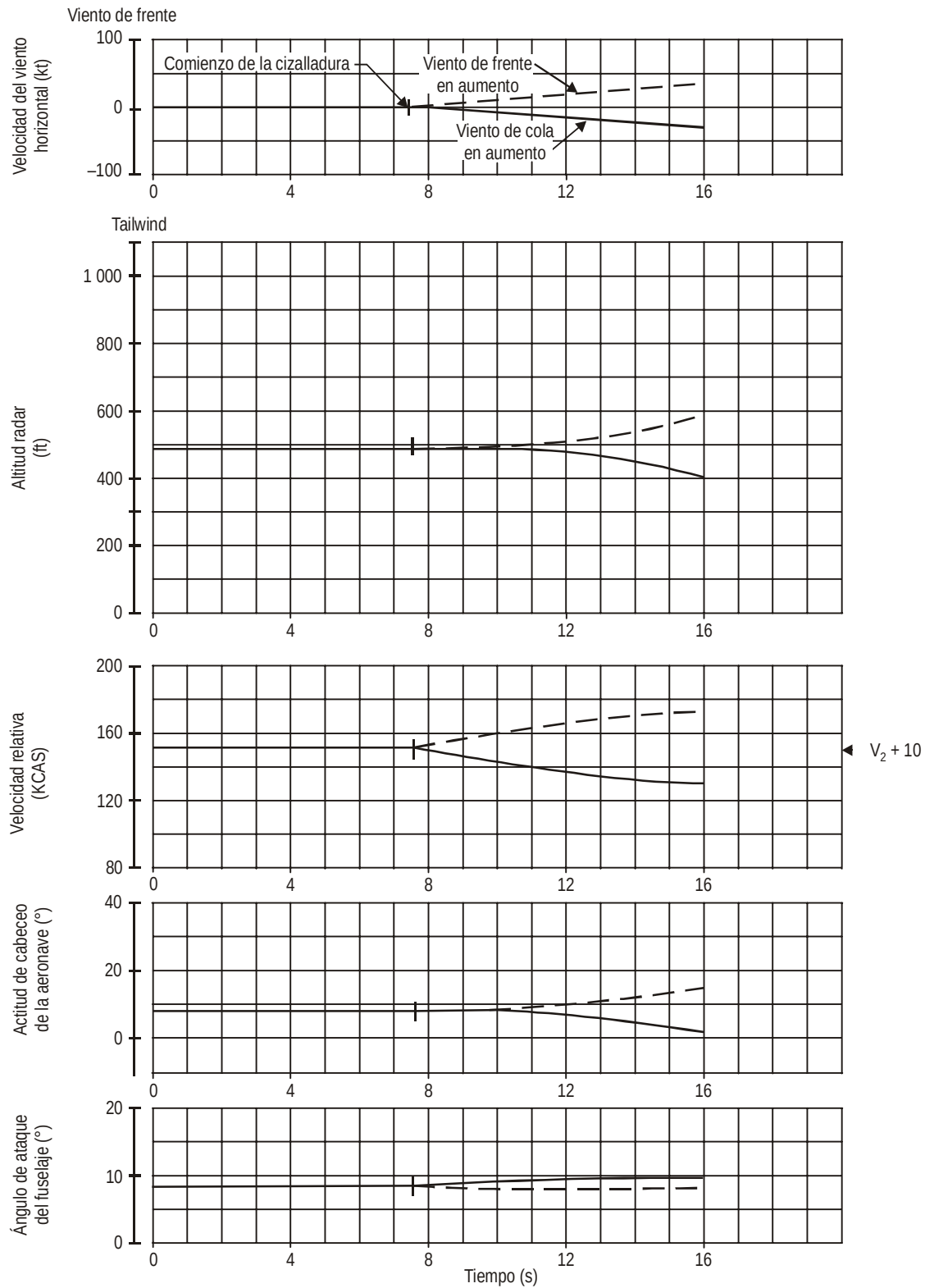


Figura 4-6. Respuesta inicial de la aeronave con mandos fijos ante las componentes de la cizalladura con viento de frente o de cola (según *Wind Shear Training Aid* de la FAA, 1987, con adaptación por la OACI)

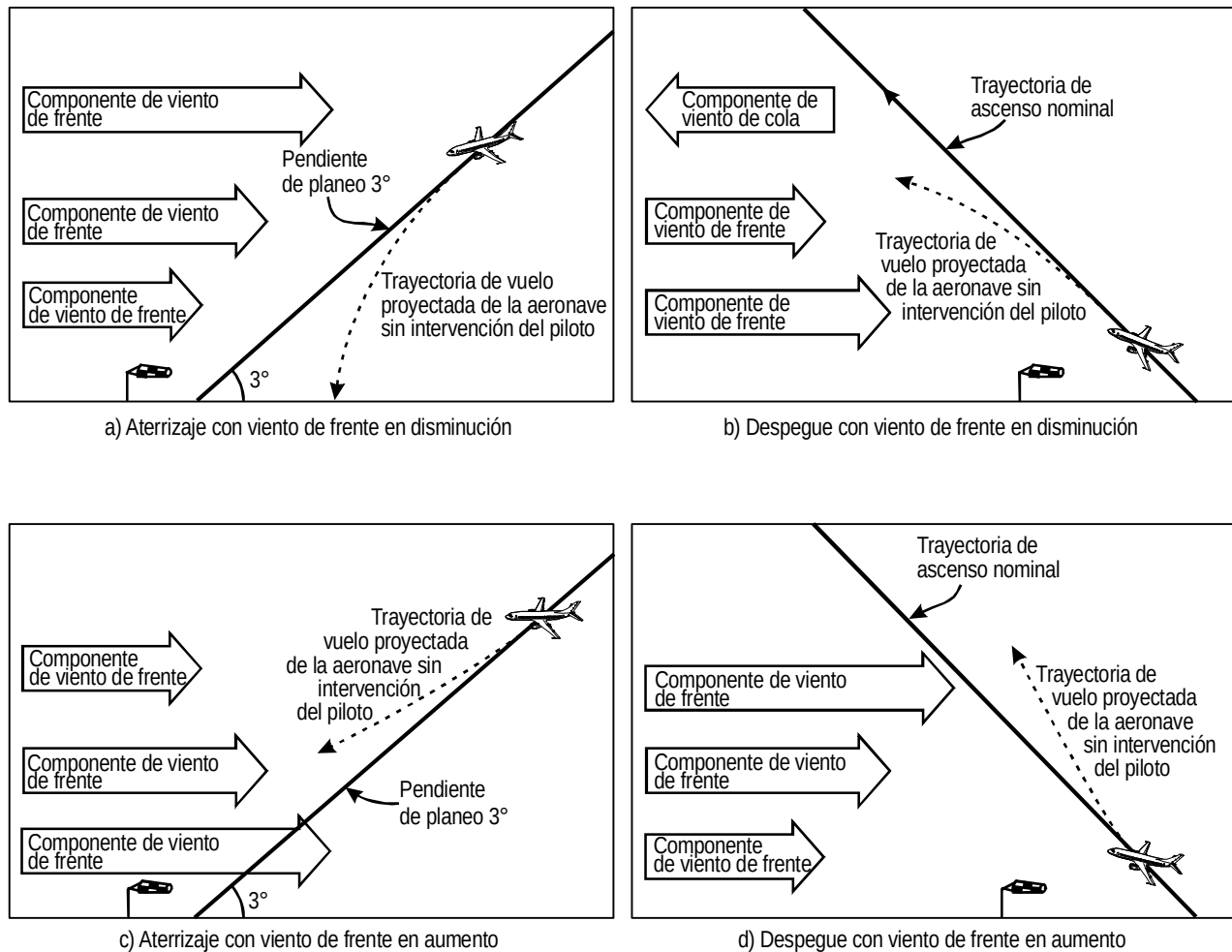


Figura 4-7. Efecto de la cizalladura del viento con viento de frente (de cola) sobre la aeronave, suponiendo que no intervenga el piloto

“permanente” en la trayectoria de vuelo. A pesar de la naturaleza “temporal” del efecto de las modificaciones de la actitud de cabeceo, una compensación entre los dos tipos de energía puede facilitar el control de la trayectoria de vuelo y posee asimismo una ventaja particular en el sentido de que la respuesta (o sea, el efecto en la trayectoria de vuelo) de la aeronave, es casi inmediata. Evidentemente, el límite de empuje disponible es el empuje máximo que permiten los motores. Existe asimismo un límite superior, llamado ángulo de pérdida, hasta el cual puede aumentarse el ángulo de ataque con el propósito de ganar altura a expensas de la velocidad, aunque por encima de esta altura la sustentación ya no aumenta, sino que por el contrario disminuye rápidamente. De este modo se vuelve a la segunda característica de la cizalladura del viento de importancia para la aeronave, que se menciona en 4.2.2 y 4.2.3, o sea, el cambio total de cizalladura del viento a través del estrato de cizalladura. La modificación total de la velocidad del viento es importante en comparación con el margen de velocidad por encima de la velocidad de pérdida en vuelo a poca altura, que es la velocidad mínima a la cual puede mantenerse el vuelo horizontal [un valor típico es del 20% aproximadamente, o sea, unos 50 km/h (25 kt), para una aeronave de transporte a reacción]. Los métodos que se recomiendan en 4.3 utilizan tanto la regulación del empuje como de la actitud de cabeceo para mantener el control de la trayectoria de vuelo. Cabe señalar que mientras la mayoría de las cizalladuras de perfil pueden parecer dentro de la capacidad de una aeronave, en retrospectiva (o sea, del análisis de perfiles detallados después del hecho) durante un encuentro real con

cizalladura del viento, el piloto ignora la fuerza de la cizalladura que está frente a la aeronave o su duración. En consecuencia, si se excedieran ciertos parámetros, as discussed en 4.3.42 a 4.3.71, se lleva a cabo el procedimiento de “motor y al aire”.

4.2.8 El efecto sobre una aeronave de la cizalladura en la componente de viento de costado se trató en 4.1.10. Dicha cizalladura tiene un efecto inicial directo sobre los ángulos de deriva y de derrape, lo cual hace que la aeronave guiñe y balancee, pero sin efecto inicial sobre la velocidad relativa ni la altura. La aeronave balancea apartándose de la cizalladura, guiña hacia esta última y se desplaza en sentido lateral derivando respecto a la trayectoria de vuelo prevista, como se indica en la Figura 4-9. En consecuencia, los métodos normales de vuelo en balanceo y en guiñada son suficientes para contrarrestar los efectos de la cizalladura con viento de costado. Por supuesto, puede ser necesario iniciar un procedimiento de “motor y

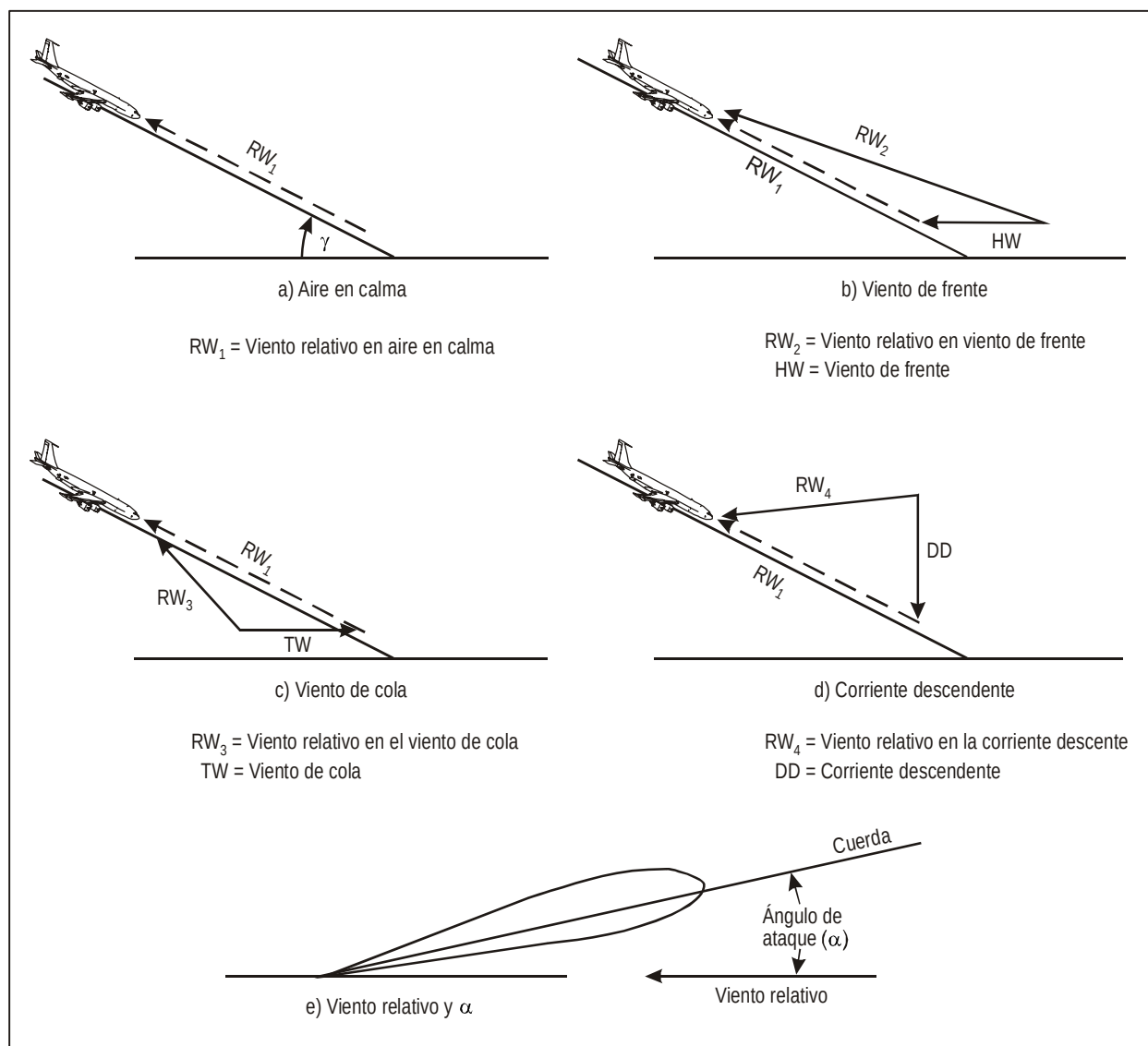


Figura 4-8. Viento relativo experimentado por una aeronave que aterriza en diversas condiciones de viento constante

al aire” debido a la presencia de una cizalladura intensa con viento de costado, pero también aquí los métodos que se utilizan en caso de viento de costado intenso pero constante, se aplicarán también para el caso de cizalladura intensa con viento de costado. Las componentes de viento de costado variables, que se presentan con cizalladura de viento de frente o de cola aumentan considerablemente el trabajo del piloto en una situación ya sumamente recargada y dificultosa.

*Nota.— En un sistema de navegación inercial, los vientos se indican en grados geográficos, mientras que los vientos en la superficie dados por el ATC se indican en grados magnéticos. En los aeródromos con gran variación magnética, esta diferencia debe tenerse en cuenta al determinar la cizalladura probable.*⁸

CIZALLADURA EN LAS COMPONENTES DE VIENTO VERTICAL (CORRIENTES ASCENDENTES Y DESCENDENTES)

4.2.9 La cizalladura del viento causada por componentes verticales intensas y de variación rápida del viento (corrientes ascendentes y descendentes) es, con mucho, la situación más peligrosa para la aeronave. El efecto general de las corrientes ascendentes y descendentes sobre la aeronave se describe en 4.1.7 a 4.1.9, donde se indica que las causas principales son las corrientes descendentes y microdescendentes asociadas con nubes convectivas. En una ráfaga descendente (una microdescendente es simplemente una forma concentrada de la ráfaga descendente), como se describe en 3.5.11 a 3.5.22, las fuertes corrientes descendentes bajan por la base de la nube y se abren radialmente poco antes de llegar al suelo. Se cree que las microdescendentes intensas forman un vórtice anula alrededor de la base de la corriente descendente poco más arriba del nivel del suelo (véanse las Figuras 3-15 y 3-16). El efecto de una ráfaga descendente sobre una aeronave que por desgracia se encuentra con una de ellas depende de la configuración de la aeronave, la intensidad y el lugar de la ráfaga (en sentido lateral o vertical) respecto a la trayectoria de vuelo. En la Figura 4-10 se indican tres casos típicos de ráfagas descendentes sobre la trayectoria de planeo y desplazada a un lado u otro de la misma.

4.2.10 El primer caso que ha de considerarse es el de una aeronave que penetra en una ráfaga descendente que se encuentre más o menos en la trayectoria de vuelo, por ejemplo en la pendiente de planeo, como se indica en la Figura 4-10 a). Cuando la aeronave se encuentra con la ráfaga descendente, suele enfrentar primero un viento de frente en aumento y quizás torbellinos o rotores en el flujo de salida. Sin embargo, hay casos en que el eje de la ráfaga descendente no es vertical, lo cual, según sea la inclinación, puede reforzar el flujo de salida por un lado de la ráfaga y debilitar el flujo de salida del lado opuesto. Por consiguiente, el viento de frente en aumento puede no encontrarse en todos los casos. Dicho viento causa una mayor velocidad relativa, la aeronave cabecea hacia arriba y vuela por encima de la pendiente de planeo o de la trayectoria de ascenso. Aunque el piloto puede contrarrestar esta tendencia y recuperar la trayectoria de vuelo prevista disminuyendo el empuje, si sospecha que el viento de frente aumenta debido a la presencia de una ráfaga descendente (ver 4.2.11), la disminución del empuje no es aconsejable y se recomienda, en cambio, iniciar inmediatamente un procedimiento de “motor y al aire”. A medida que la aeronave avanza a través de la ráfaga descendente, la componente vertical llega a ser cada vez más predominante hasta que se sobrepase el centro (o eje) de dicha ráfaga. A medida que la aeronave va llegando al centro de la ráfaga descendente, el viento de frente desaparece y es reemplazado por la corriente descendente (componente vertical), el ángulo de ataque disminuye a medida que la velocidad relativa cambia en respuesta al cambio de viento de frente a corriente descendente y continúa disminuyendo mientras aumenta la velocidad de la corriente descendente [véase la Figura 4-8 d)]⁹. Esto hace que la aeronave cabecee y vuele de nuevo a través y por debajo de la pendiente de planeo o la trayectoria de ascenso. Cuando la aeronave sale de la ráfaga descendente, la corriente descendente se ve reemplazada por un viento de cola en aumento que causa una disminución de la velocidad relativa y una variación más acentuada en la trayectoria de vuelo. Una vez que se halla dentro del eje vertical del núcleo de la ráfaga descendente, la aeronave desciende a la velocidad de esta última (o sea, “deriva” hacia abajo en el nuevo régimen de viento vertical de un modo similar a la deriva lateral con viento de costado, aunque

en el caso de la ráfaga descendente la deriva será más intensa). Para contrarrestar la corriente descendente constante, es preciso generar una velocidad ascensional equivalente aumentando el empuje y la actitud de cabeceo. La secuencia de sucesos, suponiendo que el piloto no intervenga, y la respuesta inicial de la aeronave con mandos fijos en presencia de la corriente descendente y la cizalladura con viento de cola se indican en las Figuras 4-11 y 4-12, respectivamente.

4.2.11 Si la ráfaga descendente se halla desplazada a un lado u otro de la trayectoria de vuelo, el efecto inmediato sobre la aeronave, aunque sigue siendo importante, no será normalmente tan intenso como cuando la aeronave pasa más o menos directamente por debajo de la ráfaga descendente [Figura 4-10 b) y c)]. Esto se debe a que en estos casos la componente vertical será menor, pero la componente del viento de costado mayor. Con todo, dado que las ráfagas descendentes y las microdescendentes con frecuencia se presentan en “familias”, aun si la aeronave tiene la suerte de evitar el borde de una ráfaga descendente, se recomienda el procedimiento de “motor y al aire” en caso de que se encuentren otras ráfagas descendentes, lo cual podría ocurrir fácilmente un poco más adelante en la trayectoria de la aeronave. La secuencia de aumento de la velocidad relativa, disminución y variación del ángulo de ataque y disminución de la velocidad relativa en una ráfaga descendente, todo lo cual puede hallarse en sólo 30 segundos, presentando una situación sumamente compleja y peligrosa para el piloto. Las ráfagas descendentes pueden encontrarse asimismo cuando la aeronave se halla aún en la pista antes de la elevación inicial. En estas circunstancias poco importa dónde exactamente tocará la ráfaga descendente la pista ya que todos los casos causan serios problemas para el piloto. Si la ráfaga descendente toca la pista por delante de la aeronave, aunque inicialmente la velocidad relativa aumentará más rápido de lo normal debido al viento de frente que procede del flujo de salida, después del despegue la aeronave aún tendrá que pasar a través de la corriente descendente consiguiente y el flujo de salida del viento de cola. Esto puede presentar la peor combinación posible de circunstancias ya que en el momento del despegue la aeronave está volando a niveles máximos de empuje o cerca de los mismos y probablemente con una masa comparativamente elevada. El piloto tiene que decidir si tiene o no suficiente longitud de pista para efectuar una parada de último momento o si puede continuar con el despegue. Una situación similar puede surgir si la ráfaga descendente se produce por detrás de la aeronave antes del despegue. En este caso, el súbito viento de cola puede hacer imposible que la aeronave acelere suficientemente para el despegue con la longitud de pista disponible. En 4.3 se analizan en detalle éstos y otros problemas, así como medidas que pueden adoptar los pilotos para enfrentarlos.

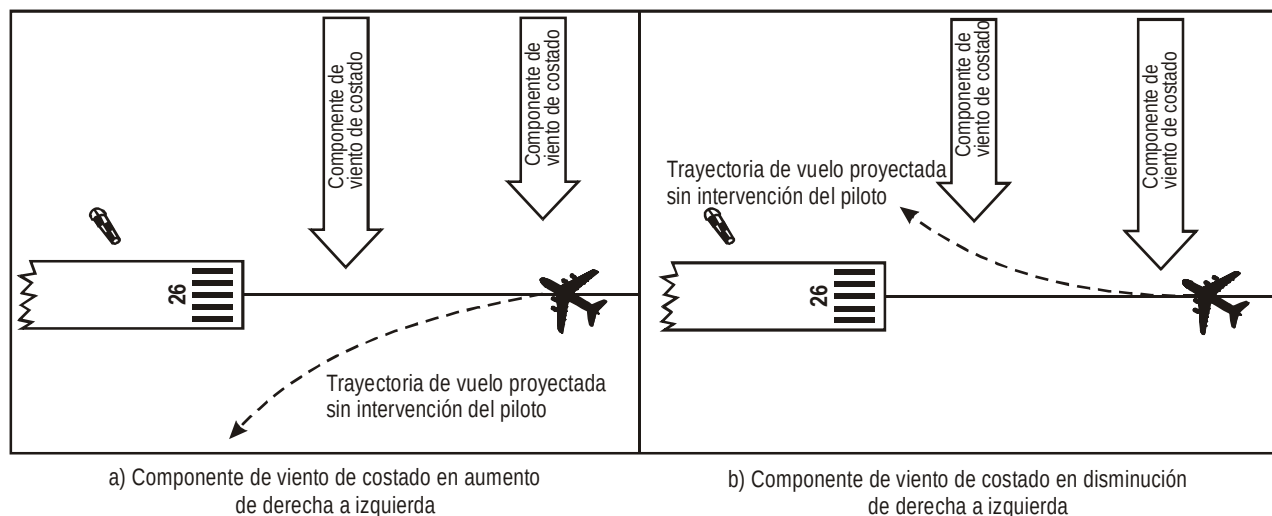


Figura 4-9. Efecto de la cizalladura con viento de costado sobre una aeronave, suponiendo que el piloto no intervenga

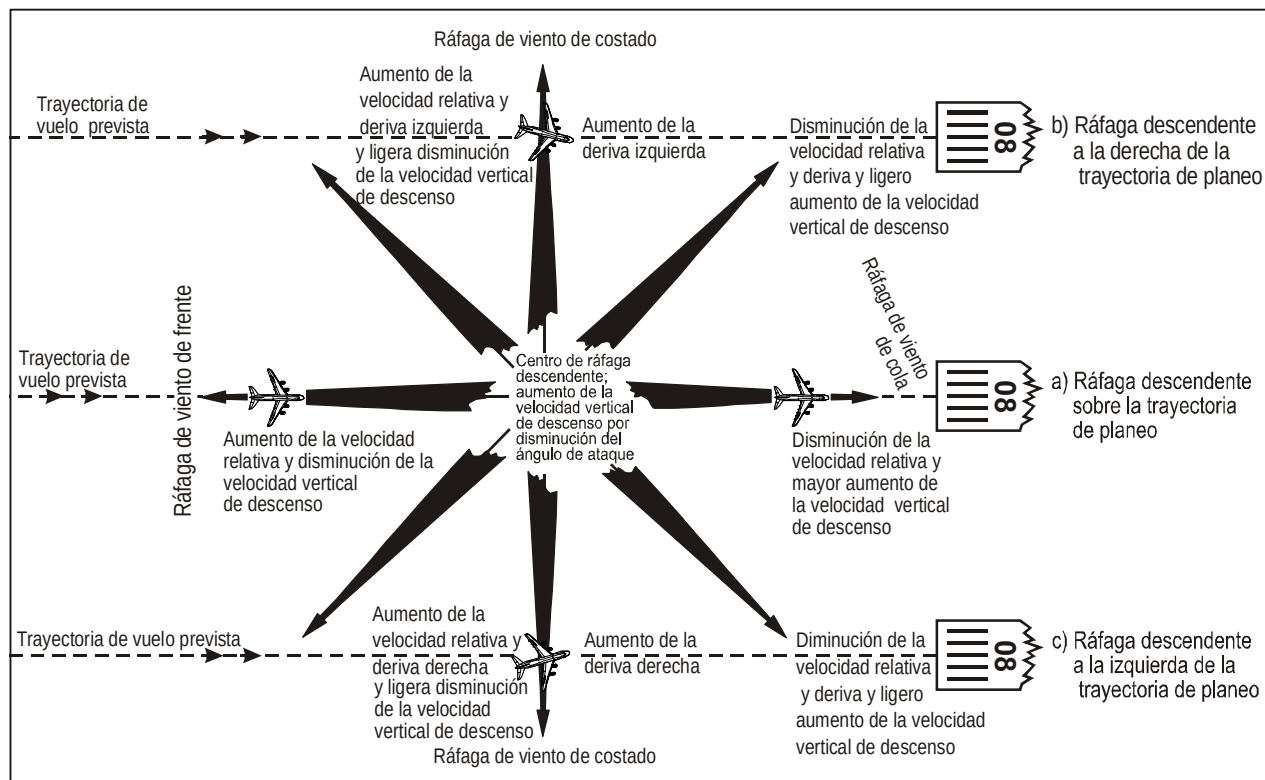


Figura 4-10. Efecto sobre una aeronave que aterriza a través de una ráfaga descendente en tres puntos respecto a la trayectoria de planeo, suponiendo que no intervenga el piloto (vista en planta)

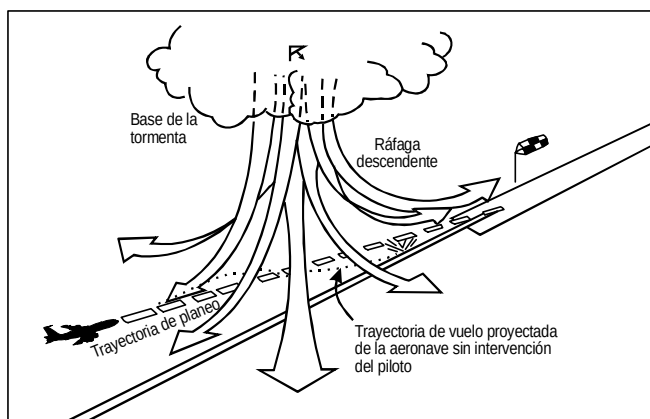


Figura 4-11. El aterrizaje a través de una ráfaga descendente modifica la trayectoria de vuelo (según Melvin, 1977)

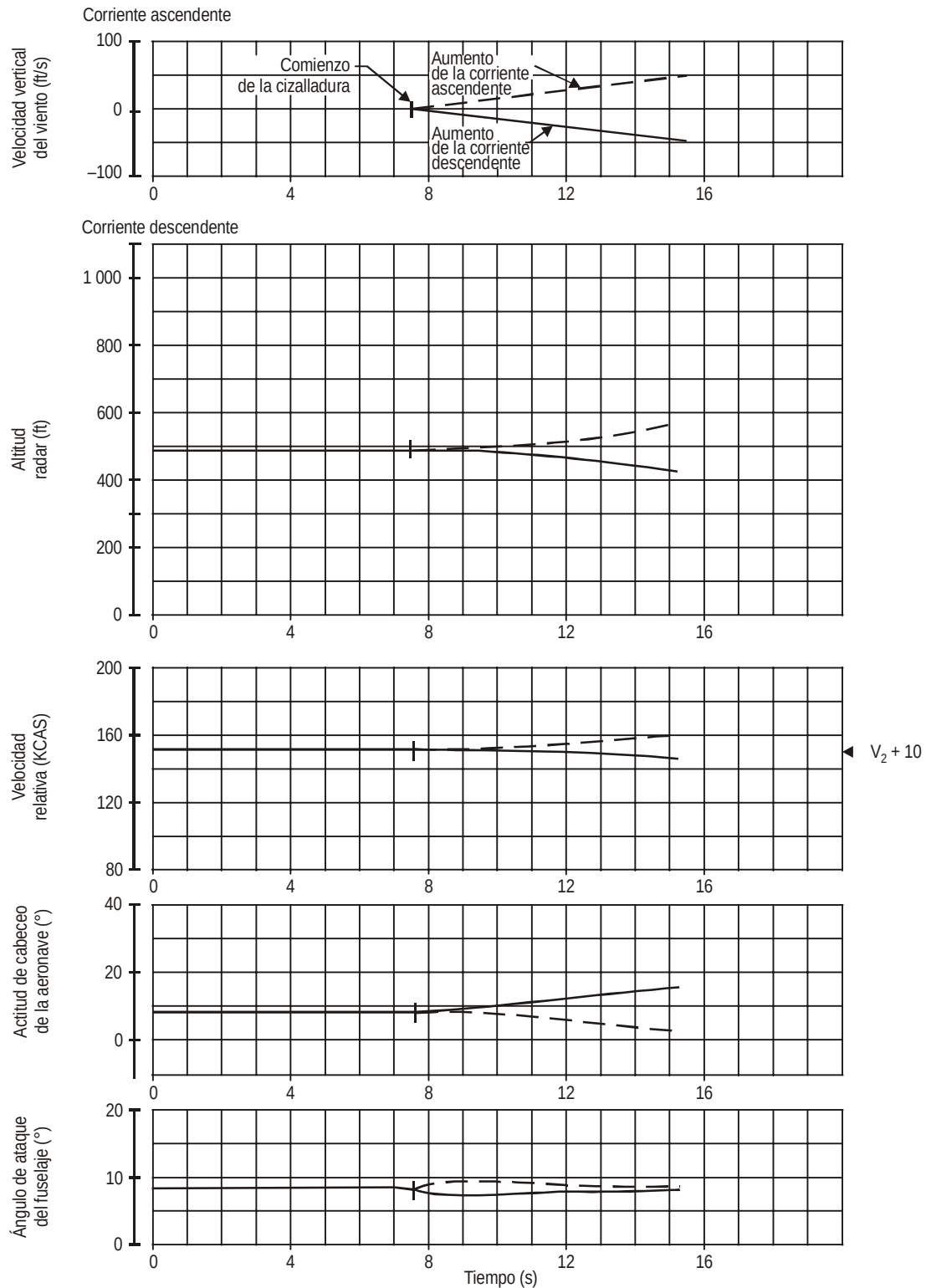


Figura 4-12. Respuesta inicial de la aeronave con mandos fijos a la componente vertical (corriente ascendente y descendente)
(según *Wind Shear Training Aid* de la FAA, 1987, con adaptación por la OACI)

4.2.12 En 3.5.8 a 3.5.10, se describen las características principales de los frentes de ráfagas. Éstos pueden encontrarse a distancias considerables de las tormentas que los originan, especialmente los frentes de ráfagas generados por líneas de turbonada. Los frentes de ráfagas pueden causar cambios súbitos y totalmente inesperados del viento en la superficie durante el aterrizaje y el despegue. La mayor parte de los encuentros de aeronaves con frentes de ráfagas se presentan como un viento de frente en aumento y consecuentemente con una cizalladura que aumenta la performance porque la aeronave vuela normalmente en dirección del viento. Sin embargo, hay casos de frentes de ráfagas que causan una cizalladura intensa e inesperada con viento de costado y no hay motivo para descartar totalmente la posibilidad de que un frente de ráfagas cause un aumento del viento de cola, especialmente durante el despegue.

4.2.13 En el párrafo 3.5.27 se mencionaron las consecuencias posibles para una aeronave que atravesara un tornado o la estela del tornado. Un caso particular de este fenómeno, documentado por Roach y Findlater (1983),¹⁰ se refiere a la pérdida de un Fokker F-28 que despegó de Rotterdam a las 1604 UTC (tiempo universal coordinado) en octubre de 1981 con destino a Eindhoven (Países Bajos). Según la investigación, Roach y Findlater establecen que “Había tormentas en la zona y la aeronave, que volaba a 900 m (3 000 ft), entró en una de ellas pocos minutos después del despegue. Después de un breve período de turbulencia moderada en las nubes, la aeronave halló de repente una turbulencia extrema en la cual se desprendió el ala de estribor y, a las 1612 UTC, la aeronave se estrelló cerca de Moerdijk, unos 25 km al sudeste de Rotterdam, pereciendo todos sus ocupantes.” Se había notificado la presencia de un tornado un poco al oeste de Moerdijk pocos minutos antes del accidente; en un operativo se tomaron varias fotografías del tornado y, menos de un minuto después, del humo del lugar del accidente. La Administración de aviación civil de los Países Bajos demostró, con ésta y otras pruebas, que era muy probable que la aeronave encontrara el tornado en la nube poco después de que el embudo del tornado se hubiera elevado desde el suelo.

4.3 ACTUACIÓN DE LA AERONAVE EN LA CIZALLADURA DEL VIENTO Y MÉTODOS QUE PERMITEN A LOS PILOTOS RECONOCER Y RESOLVER ESAS SITUACIONES

GENERALIDADES

4.3.1 Antes de poder aplicar las técnicas de recuperación que se describen en 4.3.42 a 4.3.71, el piloto debe estar en condiciones de reconocer que la aeronave se encuentra con una cizalladura del viento. Forzosamente, transcurre cierto tiempo desde el momento en que el piloto advierte los signos y los reconoce, aplica a los métodos de recuperación apropiados y la aeronave responde en consecuencia. La reducción al mínimo del tiempo transcurrido exige el reconocimiento temprano del estado de cizalladura del viento por parte del piloto y la aplicación sin vacilaciones de los correspondientes métodos recomendados de recuperación.

4.3.2 Tanto el tiempo de reconocimiento como el de reacción dependen en gran parte de la instrucción por la cual se da al piloto el conocimiento necesario para detectar rápidamente los primeros indicios de cizalladura del viento y la confianza necesaria para aplicar los métodos de recuperación sin vacilación alguna. El reconocimiento desempeña asimismo un papel importante al permitir al piloto evitar un encuentro con cizalladura del viento. Por consiguiente, los análisis posteriores se organizarán en el orden siguiente: RECONOCIMIENTO — PREVENCIÓN — PRECAUCIÓN — RECUPERACIÓN. La secuencia de decisiones y medidas del piloto respecto a la cizalladura del viento se indica en el organigrama de la Figura 4-13. Los indicios de que una aeronave se encuentra con una cizalladura del viento pueden deducirse de los instrumentos del puesto de pilotaje, gracias al equipo especial de a bordo

de aviso de cizalladura del viento, a avisos de cizalladura del viento o informes al respecto de otros pilotos o mediante claves meteorológicas externas. Además, el modo y la rapidez con que el piloto reconoce los signos de los instrumentos y de la meteorología como cizalladura del viento dependen de factores como avisos previos al piloto sobre la posibilidad de encontrarse con cizalladura del viento, por lo que estaría alerta ante esa posibilidad y la medida en que la cizalladura del viento ha formado parte de su instrucción [en particular la frecuencia y una instrucción reciente sobre cizalladura del viento en simulador (véase el Capítulo 6)].

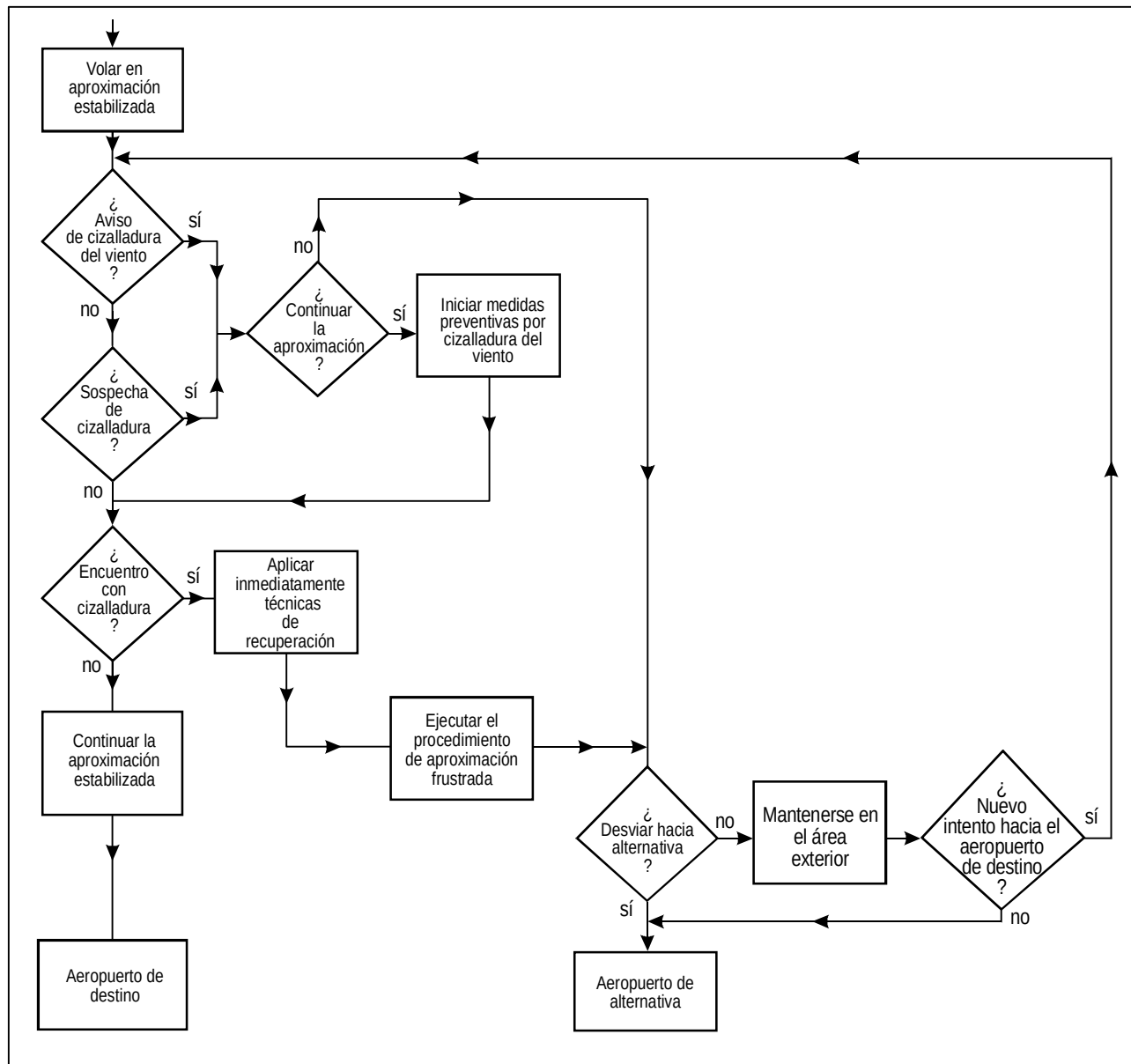


Figura 4-13. Secuencia en forma de organigrama de las decisiones y medidas del piloto respecto a la cizalladura del viento

RECONOCIMIENTO DE LA CIZALLADURA DEL VIENTO

Indicios meteorológicos externos

4.3.3 El reconocimiento de los indicios meteorológicos externos respecto a la presencia posible de cizalladura del viento a poca altura cerca de un aeropuerto permite que el piloto adopte una decisión temprana para evitar su encuentro, aplicando el procedimiento de “motor y al aire” o demorando la aproximación o el despegue hasta que mejoren las condiciones. Aun en caso de adoptar la decisión de proseguir, el reconocimiento de los signos externos de cizalladura del viento deberían alertar al piloto a prestar atención al desarrollo de la operación de despegue o aterrizaje, con referencia a los instrumentos del puesto de pilotaje. Entre las claves externas que pueden ser directamente visibles para el piloto pueden mencionarse las siguientes:

- a) vientos fuertes y racheados en la superficie, especialmente si el aeródromo está situado cerca de colinas o cuando hay edificios comparativamente grandes próximos a la pista, lo que indica la posibilidad de cizalladura del viento y turbulencia (véase 3.2.1);
- b) nube lenticular (altocumulos en forma de lente suave) que indica la presencia de ondas estacionarias, generalmente vientos orográficos descendentes (véanse 3.2.8 y 3.2.9);
- c) virga, o sea la precipitación que se desprende de la base de una nube pero que se evapora antes de llegar al suelo (especialmente en caso de nube convectiva) ya que pueden seguir existiendo corrientes descendentes que llegan al suelo, aun cuando la precipitación misma se haya evaporado (véanse 3.5.6 y 3.5.7);
- d) nube rollo que circunda la base de una tormenta y avanza al frente de la zona de precipitación, lo cual indica la presencia de un frente de ráfaga (véase 3.5.10);
- e) zonas de polvo levantado por el viento, particularmente en forma de anillo por debajo de nubes de convección, lo cual indica la presencia de una ráfaga descendente (véanse 5.1.2 y la Figura 3-16);
- f) mangas-veletas que responden a diferentes vientos;
- g) penachos de humo cizallados, cuyas secciones superior e inferior se mueven en direcciones diferentes; y
- h) tormentas de las que siempre debe suponerse que pueden producir una cizalladura del viento peligrosa.

Las repercusiones de cualquiera de los mencionados puntos en las operaciones de aterrizaje y de despegue en un aeródromo tendrían que evaluarse caso por caso, según la proximidad del fenómeno en relación a los corredores de aterrizaje y de despegue, etc.

4.3.4 En el Capítulo 5 se dan descripciones y ejemplos de avisos sobre cizalladura del viento que pueden difundirse en un aeropuerto. Tienen el propósito de alertar al piloto sobre la posibilidad de la presencia de cizalladura del viento y permitir que se adopten medidas apropiadas. En los aeropuertos que carezcan de sistemas de teledetección de cizalladura del viento, que seguirán siendo la mayoría, estos avisos se basan en gran medida en las aeronotificaciones. En consecuencia, incumbe a todos los pilotos, en lo posible, comunicar informes sobre cizalladura del viento durante la aproximación y el aterrizaje y durante el despegue y el ascenso, siguiendo los ejemplos que se indican en el Capítulo 5.

Indicaciones de los instrumentos del puesto de pilotaje o del equipo de a bordo

4.3.5 Los indicios proporcionados por el puesto de pilotaje pueden provenir del comportamiento de los instrumentos y, en ciertas aeronaves, de los sistemas especiales de a bordo de aviso de cizalladura del viento. El reconocimiento de una situación de cizalladura del viento sobre la base de las indicaciones de los instrumentos del puesto de pilotaje durante la aproximación para aterrizar resulta mucho más fácil si el piloto vuela siempre en aproximación estabilizada como rutina normal. Una aproximación estabilizada que en lo posible se realice con velocidad relativa, velocidad vertical y ángulo de cabeceo constantes, permite que el piloto reconozca con rapidez toda desviación anormal de dichos parámetros. Una aproximación estabilizada supone que la aeronave se sitúe lo antes posible en la pendiente de planeo en la configuración de aterrizaje con la velocidad relativa, la actitud de cabeceo y, en consecuencia, la velocidad de descenso apropiadas, mediante una aplicación moderada del mando de empuje/timón de profundidad, descendiendo hasta el enderezamiento. Es sumamente difícil reconocer sino las desviaciones más extremas en la velocidad relativa, el mantenimiento de la pendiente de planeo y la velocidad vertical de descenso debido a la cizalladura del viento si la aeronave no está realizando una aproximación estabilizada. Esto quizás no represente más que buenos métodos de pilotaje, pero es un hábito que podría ahorrar segundos valiosos en un encuentro con una cizalladura del viento, por lo cual debería alentarse desde la instrucción inicial.

4.3.6 Los indicios de cizalladura del viento que el piloto debería observar al leer los instrumentos son los cambios importantes en la velocidad relativa, la posición relativa a la trayectoria de planeo al aterrizar y la velocidad vertical (velocidad de ascenso o descenso) y el reglaje del empuje. Los cambios importantes en el reglaje del empuje necesarios para mantener la trayectoria de vuelo son con frecuencia el primer indicio de cizalladura del viento. En consecuencia, la vigilancia de los reglajes del empuje son un factor sumamente importante, especialmente si se utiliza el mando de gases automático. Las desviaciones anormales y súbitas respecto a la trayectoria de vuelo prevista también pueden observarse en el variómetro, el indicador de pendiente de planeo, el altímetro o el sistema de advertencia de la proximidad del terreno. El radar meteorológico de a bordo puede contribuir para poder detectar y evitar las células de convección. Los mencionados indicios están al alcance de los pilotos de la mayoría de las aeronaves de transporte y, en las aeronaves equipadas con sistemas de a bordo de aviso de cizalladura del viento, el piloto debería disponer de advertencias adicionales. En presencia de cualquiera de estos indicios sobre la presencia de cizalladura del viento a poca altura durante la aproximación para aterrizar, el piloto tiene que decidir si ha de postergar o no la aproximación o si, en presencia de la cizalladura del viento, ha de aplicar el procedimiento de “motor y al aire”. Antes del despegue, el piloto dependerá en gran medida de indicios externos sobre cizalladura del viento y, basándose en los mismos, tendrá que decidir si posterga o no el despegue. La presencia de cizalladura del viento puede detectarse asimismo por el aumento anormal de la velocidad relativa durante el recorrido de despegue. Si se detectara cizalladura del viento durante una etapa temprana del recorrido de despegue, sería aconsejable abandonar el despegue.

4.3.7 Como parte de la *Wind Shear Training Aid* de la FAA (véase la Tabla 4-1), se han preparado directrices subjetivas para evaluar las probabilidades relativas y acumulativas de los diferentes indicios observados de cizalladura del viento de convección, para ayudar al piloto a tomar decisiones apropiadas para evitar la cizalladura del viento. Las probabilidades se clasifican del modo siguiente:

ALTA PROBABILIDAD:	Se requiere prestar una atención crítica a esta observación. Es apropiado adoptar la decisión de evitarla (p. ej., desviarse o postergar la operación).
PROBABILIDAD MEDIA:	Debe considerarse la posibilidad de evitar la operación. Es apropiado adoptar precauciones.
BAJA PROBABILIDAD:	Esta observación merece consideración, aunque en general no se indica una decisión de evitar la cizalladura del viento.

4.3.8 En la Tabla 4-1 se indican las probabilidades de cada observación. Sin embargo, los indicios de cizalladura del viento deberían considerarse como acumulativos; así, si se observara más de un indicio, puede aumentarse el índice de probabilidad total a fin de tener en cuenta el conjunto de observaciones, como se indica en el ejemplo siguiente:

Ejemplo.— Cerca del punto de destino, se observa que la VIRGA descende desde nubes de base alta sobre el aeropuerto (PROBABILIDAD MEDIA). Al comenzar la aproximación, se recibe una aeronotificación que indica que otro vuelo acaba de experimentar una pérdida de velocidad relativa de 10 kt en la aproximación final al mismo aeropuerto (PROBABILIDAD MEDIA). Por consiguiente, sería pertinente elevar la ponderación de la decisión de evitar totalmente el fenómeno hasta ALTA PROBABILIDAD (lo que indica que es pertinente adoptar la decisión de evitar la cizalladura).

4.3.9 Las directrices de la Tabla 4-1 se aplican a las operaciones en las cercanías del aeropuerto [dentro de los 3 m (10 ft) de despegue o de aterrizaje a lo largo de la trayectoria prevista de vuelo por debajo de 300 m (1 000 ft) AGL]. Aunque se encontraran las condiciones meteorológicas que se describen en la Tabla 4-1 por encima de los 300 m (1 000 ft), las mismas pueden ser menos críticas en lo que atañe a la trayectoria de vuelo y esos encuentros pueden presentar otros riesgos importantes relacionados con las condiciones atmosféricas. Por consiguiente, se insta a los pilotos a ser prudentes al tomar decisiones. El uso de la Tabla 4-1 no debe reemplazar el sano juicio al adoptar decisiones para evitar la cizalladura del viento.

MEDIDAS PREVENTIVAS

4.3.10 Si, después de evaluar cuidadosamente toda la información disponible, el piloto decidiera continuar la aproximación hasta el aterrizaje o de proseguir el despegue, es preciso prepararse para posibles encuentros con cizalladura del viento, tomando las medidas preventivas especificadas en los manuales de operaciones de la aeronave y en los manuales de vuelo de las líneas aéreas. Los pilotos no deben proceder en el sentido de que suponen que la aeronave en cuestión puede hacer frente a todas las cizalladuras del viento, ya que la experiencia indica lo contrario. Un ejemplo de estas medidas figura en el extracto del manual de operaciones del B737 que se reproduce en el Apéndice 11, bajo “prevención”. Las medidas preventivas para la aproximación y el aterrizaje tienen por objeto configurar la aeronave para el aterrizaje, pero con la mayor reserva posible para las técnicas de recuperación o el procedimiento de “motor y al aire” que puedan tener que aplicarse, seleccionando las posiciones apropiadas de los flaps para el aterrizaje en circunstancias particulares y disponiendo de velocidad relativa superior para corrección con respecto al viento hasta un máximo dado, etc. Del mismo modo, las precauciones para el despegue comprenden el uso del empuje máximo y de la pista más larga apropiada. Las medidas preventivas y las técnicas de recuperación que se describen en el presente capítulo se toman de las técnicas preparadas como parte del *Wind Shear Training Aid* de la FAA (1987)¹¹ y se reproducen con autorización de esta última. Esta ayuda para la instrucción fue preparada por Boeing como contratista principal, con la participación de Douglas y de Lockheed en la preparación de conclusiones técnicas que aseguran la aplicación “dentro de la gama más amplia de aeronaves de transporte de reacción fabricadas en los Estados Unidos” (véase la Tabla 4-2). La ayuda para la instrucción contiene la cláusula exonerativa de responsabilidad e indemnización siguiente:

“CLÁUSULA EXONERATIVA DE RESPONSABILIDAD E INDEMNIZACIÓN

Este documento, *Wind Shear Overview for Management*, y los documentos anexos, *Pilot Wind Shear Guide*, *Example Wind Shear Training Programme*, *Wind Shear Substantiating Data*, y las presentaciones en vídeo *A Wind Shear Avoided* y *Wind Shear — What the Crew Can Do* se prepararon en cumplimiento del contrato DFTA01-86-C-00005 de la Federal Aviation Administration con la compañía Boeing como ayuda para la instrucción en condiciones de vuelo con cizalladura del viento. La información que figura en el presente documento y en los documentos anexos se preparó sobre la base de información

redactada originalmente para el Boeing 727 y proporciona un programa de instrucción fundamental con recomendaciones adicionales, preparadas y aprobadas por Boeing, Douglas o Lockheed para sus respectivas aeronaves teniendo presente el modo en que ese programa puede adaptarse para utilizar en determinadas aeronaves de transporte comercial fabricadas por Boeing (727, 737, 747, 757 y 767), Douglas (DC-9, MD-80 y DC-10) y Lockheed (L-1011). No se autoriza el uso de estos documentos para ningún objeto relacionado con la aeronave ni con condiciones fuera de los especificados anteriormente, ya que podría tener como consecuencia un funcionamiento inadecuado o la pérdida de mando de la aeronave, daños y pérdida de la aeronave y de vidas humanas. Todo uso, adaptación o utilización posterior a la adaptación del contenido de estos documentos por cualquier entidad y para cualquier objetivo relacionado con aeronaves, condiciones o programas de instrucción que no sean los especificados anteriormente, serán totalmente por cuenta y riesgo de la entidad responsable del uso, adaptación o utilización de la adaptación de estos documentos, por lo cual esa entidad, mediante ese uso, adaptación o uso después de la adaptación, asume ese riesgo y renuncia y abandona toda reclamación que pueda tener en contra de Boeing Company, McDonnell Douglas Corporation, Lockheed Corporation, United Airlines, Aviation Weather Associates, Helliwell, Inc., sus divisiones, subsidiarias, afiliadas y sus oficiales, directores, subcontratistas y empleados, respecto a cualquier responsabilidad, sea sobre la base de contrato (inclusive pero sin limitarse a reclamaciones en concepto de garantías expresas e implícitas), perjuicios (inclusive pero sin limitarse a reclamaciones por negligencia y responsabilidad estricta) o de otro modo debido a dicho uso, adaptación o uso de esa adaptación. Cualquiera de esas entidades (inclusive pero sin limitarse a cualquier fabricante de otras aeronaves o explotador con otro programa de instrucción, aunque no el Gobierno de los Estados Unidos) que utilice estos documentos y los adapte o utilice una adaptación de los mismos respecto a esas otras aeronaves, condiciones o programa de instrucción, conviene en consecuencia en dejar a salvo y sin perjuicio alguno a la Boeing Company, McDonnell Douglas Corporation, Lockheed Corporation, United Airlines, Aviation Weather Associates, Helliwell Inc., sus divisiones, subsidiarias y afiliadas y a sus oficiales, directores, agentes, subcontratistas y empleados, de cualquier responsabilidad, sea sobre la base de contratos (inclusive pero sin limitarse a reclamaciones en concepto de garantías expresas e implícitas), perjuicio (inclusive aunque no limitados a reclamaciones por negligencia y responsabilidad estricta) o de otro modo, debido a dicho uso, adaptación o uso de esa adaptación.

Aparte de cualquier otra disposición de este contrato en sentido contrario, la FAA aceptará los artículos entregados en virtud del mismo, junto con una salvedad agregada por el contratista, acordando no retirar esa salvedad por ninguna razón.”

4.3.11 La mejor precaución es evitar. Con todo, se presentan situaciones en las cuales los indicios de cizalladura del viento no dictan claramente la necesidad de una demora, sino que puede interpretarse en el sentido de que se dan las condiciones para que haya actividad de cizalladura del viento. En tales casos, los pilotos deben considerar el próximo paso en las medidas de la tripulación de vuelo, o sea la aplicación de precauciones. Se han preparado varias técnicas precautorias que pueden adoptar las tripulaciones con el propósito de reducir el efecto de la cizalladura del viento, si se presentara una cizalladura intensa imprevista en el despegue o la aproximación. Estas precauciones comprenden el reglaje del empuje, la selección de la pista, la selección de flaps, la velocidad relativa, la utilización del piloto automático, el mando automático de gases y el director de vuelo. Estas precauciones se prepararon mediante un análisis detallado y la simulación con piloto de varios encuentros de aeronaves con cizalladura del viento y microdescendentes. En muchos casos fue preciso refundir las soluciones, ya que no fue posible preparar recomendaciones “óptimas” para todas las condiciones.

4.3.12 La aplicación de precauciones junto con la mejor pericia de pilotaje para recuperación no puede garantizar una salida exitosa de muchas cizalladuras del viento con microdescendente. Es importante tener presente que las precauciones recomendadas tienen un efecto relativamente reducido en el resultado de un encuentro por inadvertencia con cizalladura del viento. En consecuencia, las precauciones no deben reemplazar el sano juicio del piloto, al decidir si es o no seguro proseguir la operación. Al aplicar las precauciones, no se debe alterar una decisión sobre proseguir o interrumpir en el sentido de proseguir.

Tabla 4-1. Directrices sobre la probabilidad de cizalladura del viento con microrráfaga

<i>Observación</i>	<i>Probabilidad de cizalladura del viento</i>
Presencia de atmósfera convectiva próxima a la trayectoria de vuelo prevista:	Alta
— con vientos fuertes localizados (informes de la torre u observación de polvareda, espirales de polvo, características de tornado, etc.)	
— con precipitación intensa (observación o indicación radar de sombra de contorno, sombra roja o sombra de atenuación)	Alta
— con chaparrón	Mediana
— con rayos	Mediana
— con virga	Mediana
— con turbulencia moderada (o grande) (notificada u observada con radar)	Mediana
— con temperatura/punto de rocío situados entre 17 y 28° Celsius	Mediana
Aviso a bordo del sistema de detección de cizalladura del viento (notificada u observada)	Alta
Informe del piloto de pérdida o ganancia de velocidad relativa:	
— 15 kt o más	Alta
— menos de 15 kt	Mediana
Aviso LLWAS o cambio en la velocidad del viento:	
— 20 kt o más	Alta
— menos de 20 kt	Mediana
Pronóstico de atmósfera convectiva	Baja
<i>Nota.— Estas directrices se aplican a las operaciones en la proximidad del aeropuerto (dentro de 3 millas del punto de despegue o de aterrizaje a lo largo de la trayectoria de vuelo prevista y por debajo de los 1 000 ft AGL). Los indicios deben considerarse como acumulativos. Si se observara más de un indicio, debe aumentarse la probabilidad de ponderación. El peligro aumenta con la proximidad a la atmósfera convectiva. La evaluación meteorológica debe efectuarse continuamente.</i> PRECAUCIÓN.— Actualmente no existe ningún medio cuantitativo para determinar la presencia ni la intensidad de la cizalladura del viento con microdescendente. Se insta a los pilotos a tomar precauciones al tomar decisiones.	

Precauciones para el despegue

Reglaje del empuje

4.3.13 Para el despegue debe utilizarse el empuje máximo de régimen. De este modo se acorta el recorrido de despegue y se reduce el riesgo de sobrepasar el extremo de la pista. El empuje máximo asegura asimismo la velocidad óptima de ascenso, aumentando la altura disponible para recuperación, si fuera necesario. Por último, los despegues con empuje máximo pueden eliminar el nuevo reglaje del empuje en caso de recuperación, aumentando de ese modo al máximo la posibilidad de aceleración y reduciendo la carga de trabajo de la tripulación.

Selección de la pista

4.3.14 Debe utilizarse la pista apropiada más larga que permita evitar las zonas de cizalladura del viento sospechadas. La selección de una pista apropiada comprende la consideración de la exposición a los obstáculos después de levantar vuelo y de las limitaciones debido a viento de costado y de cola. De este modo se asegura la pista máxima disponible para acelerar hasta la velocidad de rotación y puede tener como consecuencia más separación respecto al suelo al final de la pista y durante el perfil de ascenso. Si se decidiera interrumpir el despegue, se dispondría de más pista para detener la aeronave.

Selección de flaps para despegue

4.3.15 La selección del reglaje de los flaps para el despegue depende del tipo de aeronave. Deben considerarse los reglajes de la Tabla 4-2, salvo limitación por franqueamiento de obstáculos o pendiente ascensional.

Los estudios realizados respecto a los reglajes de flaps disponibles para el despegue indican que el reglaje máximo de flaps aseguraba la mejor actuación en caso de encuentro con cizalladura del viento en la pista. Sin embargo, los reglajes menores de flaps ofrecen una mejor actuación en caso de encuentro con cizalladura del viento en el aire. Los reglajes indicados en la Tabla 4-2 permiten lograr una actuación algo mejor en una amplia gama de condiciones, pero la diferencia de actuación entre los reglajes es pequeña.

Tabla 4-2. Tipo de aeronave y reglaje de los flaps para el despegue

<i>Tipo de aeronave</i>	<i>Reglaje de los flaps para el despegue</i>
B727	15
B737	5 a 15
B747	20
B757	20
B767	20
DC-9-10	10 ó 20
DC-9-20, -30, -40, -50	5 ó 15
MD-80	5 ó 15
DC-10	5 ó 20
L-1011	10 a 22

Mayor velocidad relativa

4.3.16 El aumento de la velocidad relativa durante la rotación aumenta la capacidad de la aeronave para enfrentarse con una cizalladura del viento encontrada después de levantar vuelo. La mayor velocidad relativa mejora la trayectoria de vuelo, reduce la posible exposición al viento en la cercanía de las velocidades próximas a la pérdida (intervención del agitador de palanca) y reduce la carga de trabajo del piloto.

4.3.17 Demorar la rotación hasta una velocidad relativa mayor parece significar que aumenta el riesgo de exceder los límites de la pista disponible. Sin embargo, debido al modo en que se calcula la mayor velocidad de rotación, simplemente se utiliza la pista como si la aeronave estuviera cargada hasta la masa límite considerando la longitud del campo para esa pista. Si el despegue se realizara en condiciones límite respecto a la longitud del campo, el riesgo de exceder el límite de pista disponible aumenta debido a que no

se dispone de pista adicional. Aumenta asimismo el riesgo de exceder el límite de la pista si la cizalladura del viento redujera la velocidad relativa por debajo de la mínima requerida para levantar vuelo con la actitud máxima admisible (contacto del fuselaje). Con todo, al comenzar la rotación no más allá de 600 m (2 000 ft) desde el extremo de la superficie de la pista útil, se reduce la probabilidad de exceder el límite de la pista y aumenta la energía disponible después de levantar vuelo.

4.3.18 Si se ha de utilizar una mayor V_R , el método para programar y utilizar una velocidad relativa de rotación superior es el siguiente:

- a) determinar las velocidades de V_1 , V_R y V_2 para la masa máxima real de la aeronave y el reglaje de los flaps. Es preciso regular en los instrumentos (los topes) de velocidad relativa que representan estos valores del modo normal.
- b) determinar la masa máxima límite teniendo en cuenta la longitud del campo y la V_R correspondiente para la pista seleccionada.
- c) si la V_R límite para la longitud de campo fuera mayor que la V_R de masa máxima real, utilizar la V_R que sea mayor [hasta 40 km/h (20 kt) en exceso de la V_R de masa] con masa máxima real para el despegue. Los topes de velocidad relativa no deben reajustarse a estas velocidades superiores.
- d) rotar hasta la actitud de ascenso inicial normal a la V_R aumentada y mantener esta actitud. Esta técnica produce una velocidad ascensional inicial mayor que desciende lentamente hasta la velocidad de ascenso inicial.

ADVERTENCIA.— Si se encontrara cizalladura del viento a la V_R con masa máxima real (marcada con tope) o más allá de esa velocidad, no intente acelerar hasta la V_R aumentada sino inicie la rotación sin vacilación alguna. En ningún caso debe demorarse la rotación más allá de los 600 m (2 000 ft) a partir del final de la superficie de la pista útil (véanse 4.3.42 a 4.3.71, técnica de recuperación).

4.3.19 Si no se aplicó la velocidad relativa aumentada antes de levantar vuelo, no se recomienda acelerar hasta una velocidad relativa superior a la normal después de levantar vuelo. La reducción de la actitud de cabeceo a poca altura para acelerar podría crear una situación de peligro si se encontrara cizalladura del viento.

Director de vuelo

4.3.20 No utilizar directores de vuelo con referencia de velocidad, a menos que estén equipados con guía de recuperación de cizalladura del viento.

ADVERTENCIA.— Un director de vuelo con referencia de velocidad que no posea guía de recuperación para cizalladura del viento puede ordenar un cambio en la actitud de cabeceo para adaptarse a las velocidades relativas deseadas sin tener en cuenta la perturbación de la trayectoria de vuelo. Esto puede ser contrario a los procedimientos apropiados para la recuperación frente a cizalladura del viento. Debe prescindirse de esos directores de vuelo si una recuperación es necesaria y, si el tiempo lo permite, el piloto que no esté a los mandos (PNF) debería desconectarlos.

4.3.21 Algunos directores de vuelo están equipados con un modo de actitud de cabeceo seleccionable. Si en los procedimientos normales se utiliza este modo, se lo puede utilizar eficazmente en caso de encuentro con cizalladura del viento, siempre que la actitud seleccionada se halle dentro de la gama aceptable. Con todo, si fuera necesario adoptar una actitud diferente a la seleccionada, el director de vuelo debe descartarse y, si el tiempo lo permite, ser desconectado por el PNF. En la Tabla 4-3 se proporciona un resumen de precauciones para el despegue.

Tabla 4-3. Resumen de precauciones para el despegue

-
- Aplicar el empuje máximo en régimen de despegue
 - Utilizar la pista apropiada más larga
 - Considerar la utilización de los reglajes de los flaps recomendados
 - Considerar la utilización de mayor velocidad relativa en la rotación
 - No utilizar director de vuelo con referencia de velocidad
-

Precauciones para la aproximación

Aproximación estabilizada

4.3.22 Debe establecerse una aproximación estabilizada no más allá de los 300 m (1 000 ft) AGL, a fin de aumentar la capacidad para reconocer una cizalladura del viento.

Gestión del empuje

4.3.23 Tratar de no reducir el empuje. En lugar de compensar inmediatamente un aumento en la velocidad relativa reduciendo el empuje, es prudente hacer una breve pausa para evaluar las tendencias de la velocidad. Si se presentara cizalladura con viento de cola y se iniciara la recuperación, será conveniente aprovechar la mayor velocidad relativa y la pronta disponibilidad del empuje (debido a que los motores aceleran a partir de altas RPM). Si se conecta el mando automático de gases, verificar que no ocurran reducciones inapropiadas del empuje. Si no hubiera cizalladura con viento de cola, este procedimiento puede dar lugar a una velocidad de aproximación superior a la normal, que habrá de tenerse en cuenta al aterrizar.

Selección de la pista

4.3.24 Utilizar la pista más apropiada apartada de la zona de posible cizalladura del viento y que sea compatible con las limitaciones en lo tocante al viento de costado y de cola. Una pista más larga asegura el margen más amplio para un mayor recorrido en tierra para el caso de vientos imprevistos y la posibilidad de una mayor velocidad después de la toma de contacto. Son también convenientes la aproximación de precisión (por instrumentos) y otras ayudas de control de la trayectoria de planeo (VASI, etc.) ya que realzan el reconocimiento de la cizalladura del viento proporcionando información oportuna y precisa sobre la desviación de la trayectoria de vuelo.

Selección de flaps para el aterrizaje

4.3.25 La selección del reglaje de los flaps depende del tipo de aeronave. Deben considerarse los reglajes de los flaps en la Tabla 4-4. Los estudios realizados en cuanto a cizalladura del viento utilizando todos los reglajes posibles de flaps indican que los reglajes recomendados en la Tabla 4-4 aseguran la actuación óptima de recuperación general para una amplia gama de cizalladura del viento.

Tabla 4-4. Tipo de aeronave y reglaje de los flaps para el aterrizaje

<i>Tipo de aeronave</i>	<i>Reglaje de los flaps</i>
B727	30
B737	5 a 30
B747	25 a 30
B757	30
B767	30
DC-9-10	*
MD-80	28
DC-10	35
L-1011	33

* Reglaje mínimo de los flaps para determinados modelos

Mayor velocidad relativa

4.3.26 La mayor velocidad relativa en la aproximación mejora la actuación en ascenso y reduce la posibilidad del vuelo en la proximidad de la pérdida (agitador de palanca) durante la recuperación a partir de un encuentro por inadvertencia con cizalladura del viento.

4.3.27 Si lo permite la longitud del campo de aterrizaje, la velocidad relativa puede aumentarse hasta un máximo de 40 km/h (20 kt). Esta mayor velocidad debe mantenerse hasta el enderezamiento. La toma de contacto debe ocurrir dentro de la zona normal de contacto con el suelo; no se debe hacer flotar a la aeronave a lo largo de la pista.

4.3.28 Como intervienen numerosas variables, no resulta práctico proporcionar una guía exacta sobre el efecto de la velocidad adicional de 40 km/h (20 kt) sobre la distancia real hasta la detención. El viento en la superficie puede ser un factor importante, ya que la distancia hasta la detección se ve afectada por la velocidad con respecto al suelo y no por la velocidad relativa. Si se utilizara una mayor velocidad relativa y se encontrara una cizalladura que va en aumento, puede ser necesario el procedimiento de “motor y al aire” debido a la longitud insuficiente del campo de aterrizaje en razón de la mayor velocidad de aproximación. Además, si el piloto puede estar razonablemente seguro de que los cambios del viento (debido a la topografía o las condiciones locales especiales) no producirán una actuación menor, puede resultar inconveniente aplicar una mayor velocidad de aproximación.

4.3.29 Deben también tomarse en cuenta otros factores que afectan a la distancia hasta la detención, por ejemplo la disponibilidad y la eficacia de los inversores de empuje, el estado de los neumáticos y los frenos, el estado de la superficie de la pista, etc.. En una pista seca que no se vea afectada por factores adversos, la longitud del campo de aterrizaje puede permitir una velocidad adicional de 40 km/h (20 kt) en la toma de contacto. En otros casos puede necesitarse mayor longitud de campo. En caso de duda, utilizar la pista apropiada más larga que no signifique para la aeronave un mayor riesgo debido a una posible cizalladura.

ADVERTENCIA.— La mayor velocidad en el momento de la toma de contacto significa una mayor distancia hasta la detención. Un exceso de 40 km/h (20 kt) en la toma de contacto puede aumentar la distancia hasta la detención hasta en un 25% y en algunos casos puede exceder los límites de potencia de los frenos.

*Director de vuelo o piloto automático
y mando automático de gases*

4.3.30 Durante la aproximación es conveniente utilizar el director de vuelo, el piloto automático y el mando automático de gases en la medida máxima posible. Estos sistemas pueden aliviar el trabajo del piloto, dando a la tripulación más tiempo para vigilar los instrumentos y las condiciones atmosféricas. Con todo, el uso de los sistemas automáticos de vuelo y en particular del mando automático de gases, sólo significan una ventaja si se los utiliza correctamente a falta de la debida vigilancia, estos sistemas pueden ocultar la iniciación del cizallamiento por falta de advertencia del piloto respecto a los mandos que se deben accionar. En la Tabla 4-5 se proporciona un resumen de precauciones en la aproximación.

**Tabla 4-5. Resumen de precauciones
para la aproximación**

-
- Estabilizar la aproximación no más allá de los 300 m (1 000 ft) AGL
 - Minimizar las reducciones de empuje
 - Utilizar la pista más apropiada
 - Considerar la utilización de los arreglos de los flaps recomendados
 - Considerar la utilización de una mayor velocidad de aproximación
 - Utilizar los sistemas automáticos de vuelo durante la aproximación
-

**Observación de las técnicas operacionales
normalizadas establecidas**

4.3.31 Con el propósito de ayudar a las tripulaciones para el pronto reconocimiento de un caso de encuentro con cizalladura del viento, se ha formulado una serie de recomendaciones bajo el título general de técnicas operacionales normalizadas (SOT), que se dividen en dos capítulos generales: toma de conciencia de la tripulación y coordinación de la tripulación.

4.3.32 La necesidad de destacar las SOT provenía del reconocimiento de que en la mayoría de los accidentes causados por cizalladura del viento durante el despegue, se había reducido la actitud de cabeceo de la aeronave por debajo de la actitud que mantendría el vuelo horizontal. Se adoptaba esta actitud cuando la aeronave ya estaba descendiendo hacia tierra e indicaba falta de conocimiento de la trayectoria de vuelo de parte de las tripulaciones. Esta falta de conocimiento se observó asimismo durante los estudios con simulador de pilotaje para el caso de los encuentros con cizalladura del viento. Los programas tradicionales de instrucción y los vuelos de rutina quizás no hayan destacado debidamente el control apropiado de la trayectoria de vuelo ni el problema de la pérdida de altura. El mantenimiento de la trayectoria de vuelo debería ser el punto principal respecto a la cizalladura del viento. Los métodos tales como la observación estricta de la velocidad relativa tienen que modificarse en favor del mantenimiento de la trayectoria de vuelo mediante una actitud de cabeceo controlada.

4.3.33 Las SOT que siguen destacan la trayectoria de vuelo y la actitud de cabeceo para operaciones en la proximidad del terreno. Su observación tiene como consecuencia una mejor actuación de la tripulación durante las operaciones corrientes y durante los encuentros con cizalladura del viento. Tanto en el despegue como en la aproximación para aterrizar, la toma de conciencia y la coordinación de la tripulación son elementos vitales para reconocer oportunamente la cizalladura del viento, particularmente de noche o en condiciones meteorológicas marginales.

Toma de conciencia de la tripulación

4.3.34 Es importante que la tripulación tome conciencia de cualquier cambio en las condiciones, teniendo presente que la cizalladura del viento puede formarse y disiparse rápidamente. Los casos de cizalladura más peligrosos siempre han sido aquéllos que tomaron a la tripulación por sorpresa.

4.3.35 La tripulación debe estar al tanto de las indicaciones de trayectoria de vuelo vertical normal, de manera que las desviaciones inducidas por la cizalladura del viento puedan reconocerse con mayor facilidad. En el despegue esto comprendería la actitud, la velocidad ascensional y el aumento de la velocidad relativa. En la aproximación, la información más valiosa proviene de la velocidad relativa, la actitud, la velocidad de descenso y la posición del mando de gases. El conocimiento de estos datos asegura el pronto reconocimiento de desviaciones de la trayectoria de vuelo.

4.3.36 Durante el despegue y la aproximación, es preciso estar alerta en lo tocante a las fluctuaciones de la velocidad relativa, que pueden constituir el primer indicio de cizalladura del viento. Pueden resultar fuerzas sobre la palanca de mando sumamente diferentes a las que cabe esperar durante un despegue normal o un procedimiento normal de “motor y al aire”, si la velocidad relativa se encuentra por debajo del nivel previsto o si el aumento de la velocidad relativa es reducido durante la rotación y la elevación inicial. Deben utilizarse presentaciones de trayectoria de vuelo vertical para verificar las órdenes del director de vuelo.

4.3.37 Durante el despegue y a una altura relativamente baja [menos de 300 m (1 000 ft) AGL], las SOT exigen atención y aplicación de actitud de cabeceo normal en ascenso y menos insistencia en un control estricto de la velocidad relativa. Es preciso conocer la actitud de cabeceo en ascenso inicial con todos los motores. La rotación debe realizarse a la velocidad normal en esta actitud para todos los despegues. Debe reducirse al mínimo la reducción de la actitud de cabeceo como reacción a una velocidad relativa baja hasta que se haya asegurado el franqueamiento del terreno y de los obstáculos.

4.3.38 Durante la aproximación es preciso prescindir de toda gran reducción de empuje y de cambios en la compensación en respuesta a aumentos súbitos en la velocidad relativa, ya que a continuación puede disminuir esta última. Deben vigilarse con atención los instrumentos de trayectoria de vuelo vertical, por ejemplo velocidad vertical, altímetros y desplazamiento de la pendiente de vuelo. Por otro lado, la comparación de la velocidad respecto al suelo y las indicaciones de velocidad relativa pueden proporcionar más información para el reconocimiento oportuno de cizalladura del viento. Debe lograrse una aproximación estabilizada no más allá de los 300 m (1 000 ft) AGL.

4.3.39 La carga de trabajo a bordo y las distracciones en la fase de aproximación, particularmente en condiciones meteorológicas marginales, pueden alejar la atención de los instrumentos que aseguran la advertencia temprana de deterioro de la trayectoria de vuelo. Por otro lado, la aplicación gradual del empuje en la aproximación puede ocultar una tendencia de la velocidad relativa a disminuir.

4.3.40 La tripulación debe estar preparada para ejecutar inmediatamente el procedimiento de recuperación recomendado si ocurren desviaciones respecto a las condiciones previstas que sean superiores a los valores que se indican en la Tabla 4-6, que deben considerarse únicamente como directrices, dado que es posible establecer criterios exactos. En algunos casos en que se presentan cambios a un ritmo significativo, puede ser necesario iniciar la recuperación antes de que se exceda cualquiera de los criterios citados. Pueden presentarse otras situaciones en que las diferencias durante breves períodos, particularmente en la velocidad relativa, provenientes de efectos del viento local conocidos o previstos, pueden no constituir un indicio de peligro importante. El piloto a los mandos (PF) es responsable de la evaluación de la situación y de aplicar un juicio sano para determinar la medida más segura.

Coordinación de la tripulación

4.3.41 El PF debe concentrar su atención en el vuelo de la aeronave. En un encuentro con cizalladura del viento, es preciso responder a las alarmas mediante llamadas adecuadas. El piloto que no esté a los mandos (PNF) debe concentrar su atención en la velocidad relativa, la velocidad vertical, la altitud, la actitud de cabeceo, la desviación respecto a la trayectoria de vuelo y el empuje. En caso de detectarse cualquier desviación importante respecto a la normal, el PNF debe comunicar inmediatamente la desviación. Las llamadas en el puesto de pilotaje deben normalizarse y ser fáciles de entender para asegurar el reconocimiento oportuno del fenómeno.

Ejemplo: “Velocidad vertical 1 200 descendente — velocidad relativa 115 en disminución — pendiente de planeo un punto hacia abajo.”

En la Tabla 4-7 se proporciona un resumen de los SOT.

Tabla 4-6. Condiciones previstas

<i>Despegue/aproximación</i>	<i>Aproximación</i>
1) velocidad relativa indicada ± 15 kt	1) desplazamiento de la pendiente de planeo ± 1
2) velocidad vertical ± 500 ft/min	2) posición del mando de gases no usual
3) actitud de cabeceo $\pm 5^\circ$	durante un período prolongado

Tabla 4-7. Resumen de técnicas operacionales normalizadas

<i>Despegue</i>	<i>Aproximación</i>
— conocimiento de los valores normales de actitud, velocidad de ascenso y aumento de la velocidad relativa	— conocimiento de los valores normales de actitud, velocidad de descenso, velocidad relativa y posición del mando de gases
— conocimiento/utilización de la actitud de ascenso inicial con todos los motores	— verificación de los mandos del director de vuelo
— rotación continua al régimen normal	— conveniencia de evitar reducciones importantes del empuje
— verificación de los mandos del director de vuelo	— observación de los instrumentos de trayectoria de vuelo vertical, comunicación de las desviaciones (copiloto)
— limitar al mínimo la reducción de las actitudes de cabeceo	— conocimiento de las directrices para la decisión de recuperación
— vigilancia de los instrumentos de trayectoria de vuelo vertical, comunicación de las desviaciones (copiloto)	
— conocimiento de las directrices para la decisión de recuperación	

TÉCNICA DE RECUPERACIÓN DE CIZALLADURA DEL VIENTO**Generalidades**

4.3.42 El objetivo primordial de una técnica de recuperación consiste en mantener la aeronave en vuelo el mayor tiempo posible, abrigando la esperanza de salir de la cizalladura. Se ha considerado una

amplia variedad de métodos para establecer el que cumpla mejor con este objetivo. Se obtuvieron los mejores resultados cabeceando hacia una actitud prevista inicial, aplicando simultáneamente el empuje necesario. En la preparación de este método se consideraron varios factores.

4.3.43 Los estudios indican que los encuentros con cizalladura del viento se producen con poca frecuencia y que sólo se dispone de unos pocos segundos para iniciar una recuperación eficaz. Además, durante las situaciones de alta tensión, es típico que el piloto se vea limitado en la lectura de los instrumentos y que en los casos extremos sólo observe uno. Por último, la pericia en la recuperación no es un ejercicio cotidiano. Estos factores indican que el método de recuperación no sólo ha de ser eficaz sino sencillo, fácil de recordar y de aplicación general.

4.3.44 Se han llevado a cabo amplios ensayos y evaluaciones por parte de los pilotos. Aunque en una gama de actitudes de recuperación (que comprende 15° y la serie de actitudes de ascenso inicial con todos los motores) se observa una buena capacidad de recuperación para una amplia variedad de cizalladuras del viento, se seleccionó el valor de 15° como actitud de cabeceo prevista inicial para el despegue y el aterrizaje. Otras ventajas de la actitud de cabeceo inicial prevista de 15° consisten en que se recuerda fácilmente en situaciones de emergencia y se presenta destacadamente en los indicadores de director de actitud.

Nota 1.— actitudes previstas del L-1011:

*despegue = 17,5°,
aproximación = 15°.*

Nota 2.— Los explotadores que utilizan actitudes de cabeceo prevista calculadas de antemano, tales como actitud de cabeceo con todos los motores para despegues y el procedimiento de “motor y al aire” normales, pueden utilizar estas actitudes en lugar de la actitud de recuperación prevista inicial recomendada.

4.3.45 Aunque existen otros métodos más complicados que quizás aprovechen mejor la actuación de la aeronave, no cumplen con la condición de sencillez y de facilidad de recordar. Las evaluaciones indican que el método recomendado proporciona un medio sencillo y eficaz de recuperación en un encuentro con la cizalladura del viento.

4.3.46 A continuación figura un análisis del método de recuperación recomendado. Se examinan los métodos de recuperación en el despegue y la elevación inicial y asimismo durante la aproximación, ya que el método es el mismo para ambas situaciones. Más tarde se presentará el método de recuperación para los encuentros durante el despegue en la pista.

Encuentros durante el despegue y después de la elevación inicial y durante la aproximación

4.3.47 El reconocimiento de la cizalladura del viento es el punto fundamental para poder adoptar una decisión oportuna de recuperación. El procedimiento de recuperación recomendado debe iniciarse en el momento en que la trayectoria de vuelo se vea amenazada por debajo de los 300 m (1 000 ft) AGL en el despegue o la aproximación. Se repiten en la Tabla 4-8 las directrices relativas a los valores inaceptables de deterioro de la trayectoria de vuelo.

4.3.48 Se reitera que estos valores deben considerarse como directrices, ya que no es posible establecer criterios exactos. En todos los casos, incumbe al PF evaluar la situación y utilizar su sano juicio para determinar la medida más segura. En ciertos casos en que se presentan cambios significativos, puede ser necesario iniciar la recuperación antes de que se exceda cualquiera de los valores citados.

4.3.49 Si se encontrara por inadvertencia la cizalladura del viento después de la elevación inicial o durante la aproximación, debe iniciarse inmediatamente el método de recuperación recomendado. Si ocurriera durante la aproximación, no intentar el aterrizaje. (Con todo, si durante la aproximación se encontrara una cizalladura en aumento, puede procederse al procedimiento normal de “motor y al aire” en lugar de la maniobra de recuperación.) El método de recuperación después de la elevación inicial o durante la aproximación es igual para ambos casos y se describe a continuación.

Empuje

4.3.50 Aplicar dinámicamente el empuje necesario para asegurar una actuación apropiada de la aeronave. Desacoplar el mando automático de gases si fuera necesario. Evitar de exigir excesivamente los motores, salvo que sea necesario para evitar el contacto con el suelo. Una vez lograda la seguridad de la aeronave, regular el empuje a fin de mantener los parámetros de la aeronave dentro de los límites indicados.

Cabeceo

4.3.51 El método de control del cabeceo para la recuperación de un encuentro con cizalladura del viento después de la elevación inicial o durante la aproximación, es el siguiente:

- a) Al ritmo normal de cabeceo, aumentar o reducir la actitud de cabeceo en la medida de lo necesario con el propósito de llegar a la actitud prevista inicial de 15°. El PNF debe desacoplar el piloto automático o el director de vuelo, salvo que esté específicamente previsto para operaciones en condiciones de cizalladura del viento o se utilice un director de vuelo con selección de cabeceo en el cual se haya regulado la actitud deseada.
- b) Respetar siempre la indicación del sacudidor de palanca. Considerar el sacudidor de palanca intermitente como límite superior de cabeceo. En caso de cizalladura intensa, la palanca puede agitarse por debajo de la actitud de cabeceo de 15°.
- c) Si la actitud se ha limitado a menos de 15° con el propósito de detener el sacudidor de palanca, aumentar la actitud hacia 15° tan pronto como se detenga el sacudidor.
- d) Si la trayectoria de vuelo vertical o la pérdida de altura siguen siendo inaceptables después de llegar a los 15°, seguir aumentando la actitud de cabeceo suavemente y en forma gradual.

Tabla 4-8. Directrices relativas a los valores inaceptables de deterioro de la trayectoria de vuelo

<i>Despegue/aproximación</i>	<i>Aproximación</i>
1) velocidad relativa indicada ± 15 kt	1) desplazamiento de la pendiente de planeo ± 1 punto
2) velocidad vertical ± 500 ft/min	2) posición del mando de gases no usual durante un período prolongado
3) actitud de cabeceo $\pm 5^\circ$	

- e) Controlar el cabeceo de un modo suave y continuo (en etapas de unos 2°) para evitar que se sobrepase demasiado o que falte demasiado para alcanzar la altura deseada.
- f) Una vez que la aeronave se encuentre en ascenso y el contacto con el suelo ya no represente una preocupación inmediata, debe aumentarse la velocidad relativa mediante reducciones cuidadosas en la actitud de cabeceo.

Configuración

4.3.52 Mantener la posición de los flaps y del tren hasta estar seguro del espacio libre sobre el terreno. Aunque se dispusiera de un ligero aumento de la actuación después de replegar el tren, la actuación inicial puede verse afectada cuando las tapas del tren se abren para el repliegue. Aunque la extensión de los flaps durante la recuperación después de la elevación inicial puede ser beneficiosa para la actuación, no es un método que se recomienda por las razones siguientes:

- a) Los flaps que se repliegan accidentalmente (dirección usual del movimiento) tienen una repercusión sumamente perjudicial sobre la actuación.
- b) Si se inicia el repliegue del tren antes de reconocer la presencia de cizalladura del viento, la extensión de los flaps en un ángulo superior al del despegue puede tener como consecuencia la excitación de la bocina de advertencia, lo cual distrae a la tripulación.

Otras consideraciones

4.3.53 Si durante la aproximación se conectan los sistemas de piloto automático/director de vuelo proyectados específicamente para funcionar en caso de cizalladura del viento, deben utilizarse durante la maniobra de recuperación. Estos sistemas pueden ayudar a la recuperación en caso de encuentro por inadvertencia con cizalladura del viento. Sin embargo, debido al escaso tiempo disponible para el reconocimiento y la respuesta, no hay que conectar el piloto automático ni el mando automático de gases si estos sistemas no estaban conectados antes de la recuperación.

ADVERTENCIA.— Un director de vuelo o un sistema de vuelo automatizado que no esté proyectado específicamente para funcionar en caso de cizalladura del viento, puede mandar un cambio de actitud de cabeceo para adaptarse a las velocidades relativas buscadas o bien una actitud de cabeceo fija, sea cual fuere el deterioro de la trayectoria de vuelo. Esta directriz puede ser contraria a los procedimientos apropiados para la recuperación en caso de cizalladura del viento. Estos sistemas deben dejarse de lado si se requiere la recuperación y, si el tiempo lo permite, ser desconectados por el PNF.

4.3.54 La utilización de la dirección con volante de mando de piloto automático (CWS) no se ha evaluado aún plenamente en cuanto a su eficacia en caso de encuentro con cizalladura del viento. Una consideración relativa al CWS es que por lo general es un modo de autopiloto con canal único por lo que sólo tiene una posibilidad reducida de control. En todo caso, si se utiliza el CWS durante un encuentro con cizalladura del viento, su utilización debe interrumpirse si causa dificultades para lograr la actitud deseada.

4.3.55 Algunos directores de vuelo están equipados con un modo de actitud de cabeceo que puede seleccionarse. Si en los procedimientos normales se utiliza esta característica, el modo de actitud de cabeceo seleccionable puede utilizarse eficazmente en caso de encuentro con cizalladura del viento, siempre que la actitud seleccionada se halle dentro de la gama aceptable. Sin embargo, si fuera necesario seleccionar una actitud diferente, el director de vuelo debe dejarse de lado y, si el tiempo lo permite, ser desconectado por el PNF.

4.3.56 Es preciso evitar los cambios de compensación del estabilizador en respuesta a breves cambios de velocidad relativa o fuerzas sobre la palanca producidos por la cizalladura del viento. Con todo, debe utilizarse la compensación del estabilizador para anular la fuerza sobre la palanca debida a la aplicación del empuje.

4.3.57 Durante la recuperación, el PNF debe anunciar las desviaciones en la trayectoria de vuelo vertical utilizando el baroaltímetro, el radioaltímetro o el indicador de velocidad vertical, según sea el caso. Por ejemplo, “descenso 500, altura 200, ascenso 400, altura 300, etc.” Los operadores de aeronaves que exigen la presencia de un mecánico a bordo pueden encargar al segundo oficial que comunique las diferencias.

4.3.58 Los vientos que cambian con rapidez pueden causar desviaciones rápidas en cabeceo y en balanceo, prácticamente sin intervención del piloto, así como variaciones de la actitud que causan la activación del sacudidor de palanca.

4.3.59 Es preciso informar lo antes posible a la torre el encuentro con la cizalladura del viento, ya que las aeronaves que vienen a continuación pueden carecer de la actuación necesaria para la recuperación necesaria. Puede suceder asimismo que la cizalladura del viento aumente de intensidad, con lo cual el vuelo a través de la misma sería aún más peligroso. (La notificación de encuentros con cizalladura del viento por el piloto se trata en el Capítulo 5.) Tanto los pilotos como los controladores deben tener conciencia de que su intervención oportuna puede evitar un desastre inminente y que unos pocos segundos pueden salvar muchas vidas. En la Tabla 4-9 figura un resumen del método de recuperación de cizalladura del viento después de la elevación inicial o durante la aproximación.

Tabla 4-9. Resumen del método de recuperación de cizalladura del viento después de la elevación y durante la aproximación

Empuje

- aplicar el empuje necesario

Cabeceo

- regular hacia los 15°
- aumentar más allá de los 15° si fuera necesario para asegurar una trayectoria de vuelo aceptable
- respetar siempre la indicación del sacudidor de palanca

Configuración

- mantener la configuración existente
-

Encuentro durante el despegue en la pista

4.3.60 La cizalladura del viento es difícil de reconocer durante el recorrido de despegue debido a que la velocidad relativa cambia con rapidez. Además de los indicios visuales descritos anteriormente, las fluctuaciones inhabituales en la velocidad relativa, el aumento escaso o errático de la velocidad relativa pueden ser indicios del encuentro con cizalladura del viento.

4.3.61 El criterio de proseguir o interrumpir el despegue basándose en la velocidad de decisión en caso de falla de un motor (V_1) puede no regir para las condiciones de cizalladura del viento, ya que la velocidad respecto al suelo puede ser muy superior a la velocidad relativa (Figura 4-14). En consecuencia,

puede no resultar posible detener la aeronave en la pista durante un despegue interrumpido. La capacidad para la elevación inicial depende de la velocidad relativa; la capacidad de detener la aeronave depende en gran medida de la velocidad respecto al suelo.

Antes de V_1

4.3.62 El despegue debe interrumpirse si se presentan variaciones inaceptables de la velocidad relativa por debajo de la V_1 indicada y el piloto decide que no queda suficiente tramo de pista para detener la aeronave.

Después de V_1

4.3.63 Debe continuarse el despegue si se ha llegado a la velocidad V_1 .

Empuje

4.3.64 Debe aplicarse dinámicamente el empuje necesario para asegurar una actuación suficiente de la aeronave. Evitar de exigir demasiado al motor, a menos que sea necesario para garantizar la seguridad de la aeronave. Una vez lograda esta seguridad, regular el empuje para mantener los parámetros del motor dentro de los límites indicados. Sin embargo, el empuje de los motores más allá de los límites normales NO es suficiente por sí solo para compensar los efectos de un encuentro por inadvertencia con cizalladura del viento. El factor más importante en la recuperación en esas condiciones es el control apropiado de la actitud de cabeceo.

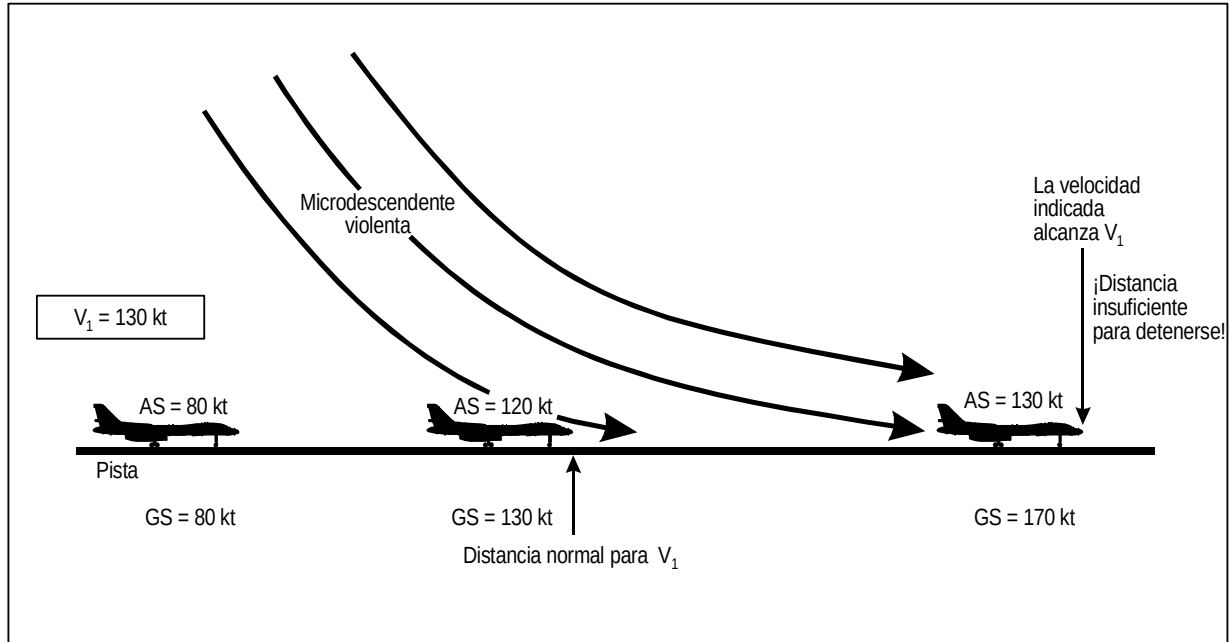


Figura 4-14. Efectos de cizalladura del viento sobre el punto de decisión para proseguir o interrumpir el despegue. La velocidad de decisión V_1 podría no alcanzarse hasta un punto en que quede un tramo de pista insuficiente para interrumpir el despegue

(según *Wind Shear Training Aid* de la FAA, 1987)

Cabeceo

4.3.65 Una vez que se ha logrado la V_R , entrar en rotación al ritmo normal hacia la actitud de cabeceo de 15° . Sin embargo, en caso de encuentro con cizalladura del viento intensa, podría no alcanzarse V_R ni tampoco existir la posibilidad de interrumpir el despegue. En este caso debe iniciarse la rotación no más allá de los 600 m (2 000 ft) a partir del extremo de la superficie útil (Figura 4-15).

Nota.— Las aeronaves de la categoría de transporte típicamente pueden levantar vuelo de 5 a 10 kt antes de llegar a V_R (excepto el B727, que no puede levantar vuelo antes de llegar a V_R).

4.3.66 No deben restringirse ni la actitud de cabeceo ni la velocidad de rotación para evitar el contacto de la cola del fuselaje con la pista, ya que puede requerirse una plena actitud de cabeceo para la elevación inicial en el tramo restante de pista. Véase en la Tabla 4-10 un resumen del método de recuperación de despegue (en la pista). Una vez en el aire, seguir el “método de recuperación después de la elevación inicial” analizado anteriormente.

4.3.67 La pista restante durante el despegue puede determinarse en las pistas que tengan marcas y luces apropiadas. Aunque las señales en cuestión por lo general tienen el propósito de ayudar a las aeronaves que aterrizan, también pueden utilizarse para determinar la pista disponible durante un despegue. En la Figura 4-16 pueden apreciarse las señales y la iluminación típicas de las pistas para aproximación de precisión de la OACI y de la FAA. Para una aeronave que se desplaza desde la izquierda hacia la derecha en la figura, el primer par de señales sombreadas sencillas a cada lado del eje indica 900 m (3 000 ft) de pista restante [o sea 300 m (1 000 ft) hasta el momento en que haya que iniciar la rotación]. A medida que continúa el despegue, el punto restante a 600 m (2 000 ft) se indica con el primer par de marcas de sombreado doble que se encuentre. Todas estas marcas de sombreado se hallan a intervalos de 150 m (500 ft) a partir del umbral del extremo de partida.

Tabla 4-10. Método de recuperación de despegue (en la pista)

Empuje

- aplicar el empuje necesario

Cabeceo

- hacer rotar hacia 15° [no más allá de los 600 m (2 000 ft) restantes]
- aumentar más allá de los 15° si fuera necesario para la elevación inicial

Nota.— Después de la elevación inicial, seguir el método de recuperación correspondiente.

4.3.68 Otra indicación de pista restante puede ser la iluminación. Las pistas de aproximación de precisión de la OACI y de la FAA tienen luces de borde amarillas y no blancas para los últimos 600 m (2 000 ft) de pista, vistas en la dirección de despegue. Además, puede utilizarse la iluminación del eje de la pista para determinar la longitud de pista restante. La tripulación de una aeronave que despegue en el sentido de izquierda a derecha en la Figura 4-16 vería luces de eje de color blanco hasta los 900 m (3 000 ft) a partir del extremo de la pista [300 m (1 000 ft) hasta el momento de iniciar la rotación]. Desde los 900 m (3 000 ft) hasta el punto del tramo restante de 300 m (1 000 ft), las luces del eje alternan entre el color blanco y el rojo. Las luces de eje son todas rojas en los últimos 300 m (1 000 ft) de la pista. Una línea de luces rojas perpendicular a la pista indica el fin de la superficie útil.

4.3.69 En la Figura 4-17 se ilustran las señales y luces de una pista para aproximaciones que no sean de precisión de la FAA. El indicador principal de la distancia restante en estas pistas consiste en señales de distancia fija a ambos lados del eje, a unos 300 m (1 000 ft) a partir del umbral de la pista. En las pistas

que posean estas señales, es necesario que el piloto aplique su criterio y esté familiarizado con las características particulares a lo largo de la pista para estimar el punto de tramo restante de 600 m (2 000 ft).

4.3.70 En la Figura 4-18 se ilustran las señales y luces de una pista para aproximaciones que no sean de precisión de la OACI. Esta figura representa la configuración óptima que puede presentarse. La mayoría de estas pistas comprendería algunas de estas características, aunque no forzosamente todas. Poseen señales sombreadas sencillas a ambos lados del eje de la pista a intervalos de unos 150 m (500 ft) a partir del umbral de la pista. Puede también haber señales de distancia fijas a unos 300 m (1 000 ft) del umbral. Además, las luces de borde de pista pueden ser de clave de colores similares a las pistas para aproximaciones de precisión, con luces amarillas en lugar de blancas, aproximadamente en los últimos 600 m (2 000 ft) de la pista.

Métodos de recuperación no recomendados

4.3.71 Al establecer el método recomendado en las páginas precedentes, se evaluaron muchos métodos de recuperación en casos de cizalladura del viento. Estos métodos, que se indican a continuación, NO se recomiendan, ya que pueden reducir las posibilidades de supervivencia en caso de encuentro con cizalladura del viento:

- Al tratar de mantener la velocidad relativa prevista, no se utiliza la capacidad máxima de ascenso de la aeronave.
- Al tratar de cabecear directamente hasta accionar el sacudidor de palanca, no se utiliza al máximo la energía disponible de la aeronave, lo que tiene como consecuencia una trayectoria de vuelo incorrecta y un mayor peligro de pérdida.
- Al tratar de volar con el ángulo óptimo de ataque para rendimiento aerodinámico, no se utiliza la capacidad de gradiente máximo a corto plazo de la aeronave.

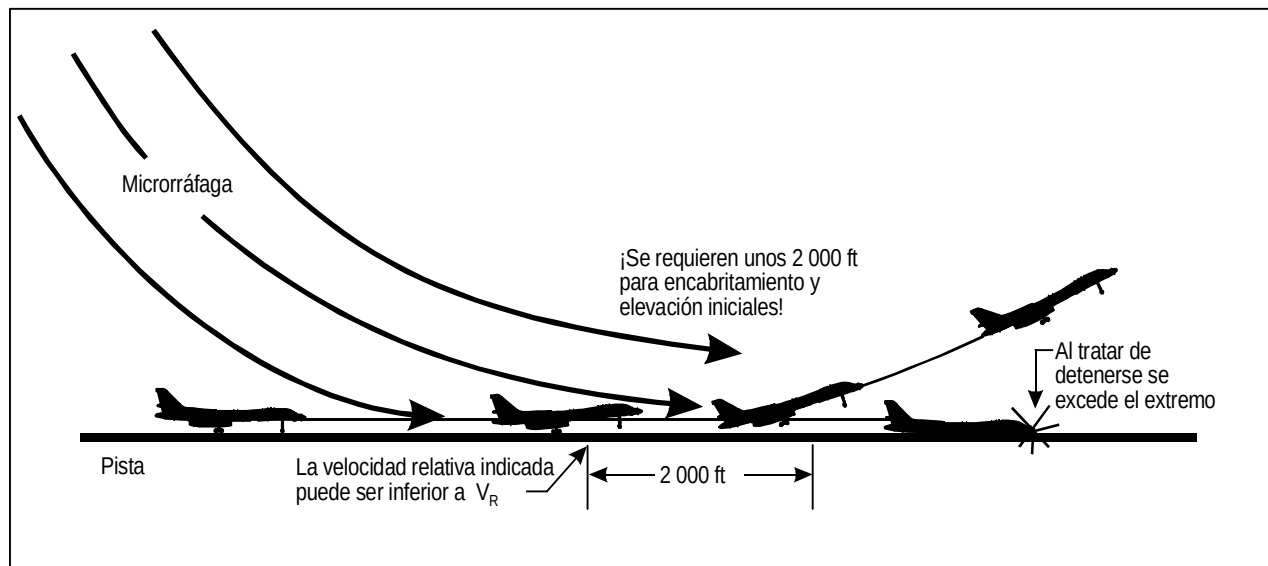


Figura 4-15. Efectos de la cizalladura del viento sobre la decisión de iniciar la rotación.

Dichos efectos pueden forzar la rotación a velocidades inferiores a V_R .

La rotación debe comenzar no más allá de los 2 000 ft a partir del comienzo de la pista.

(según *Wind Shear Training Aid* de la FAA, 1987)

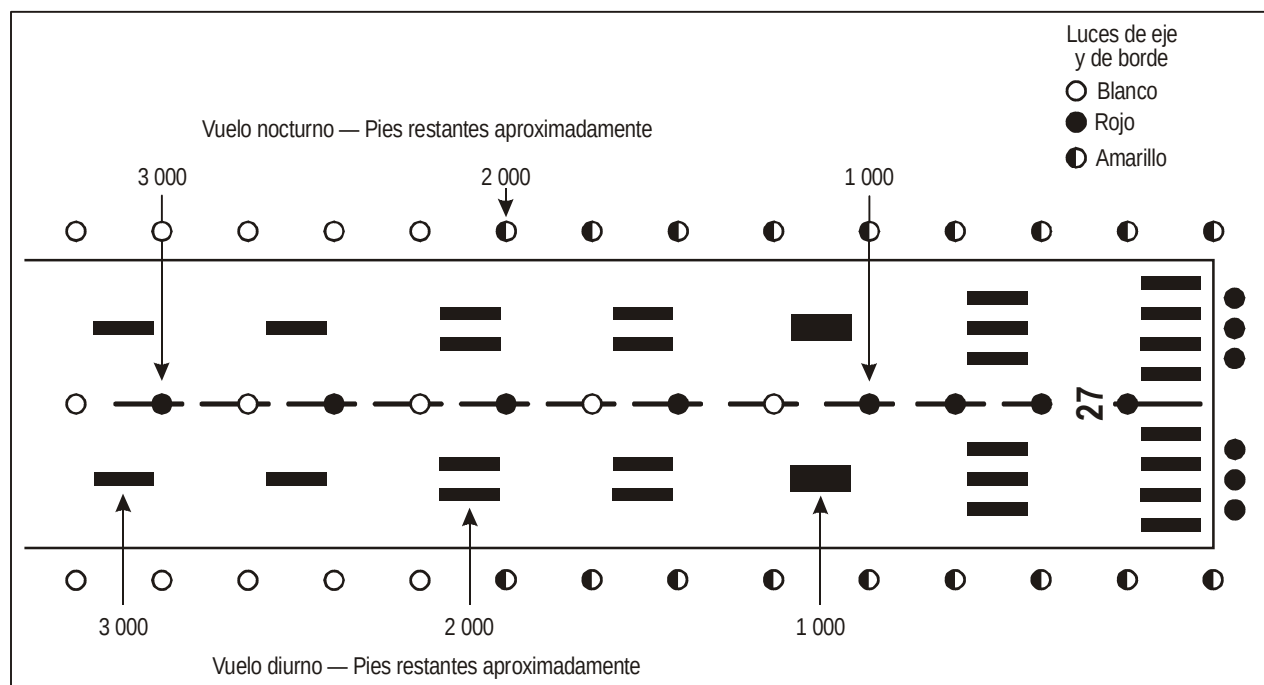


Figura 4-16. Señales e iluminación en una pista para aproximaciones de precisión de la OACI y de la FAA

(según *Wind Shear Training Aid* de la FAA, 1987, con adaptación por la OACI)

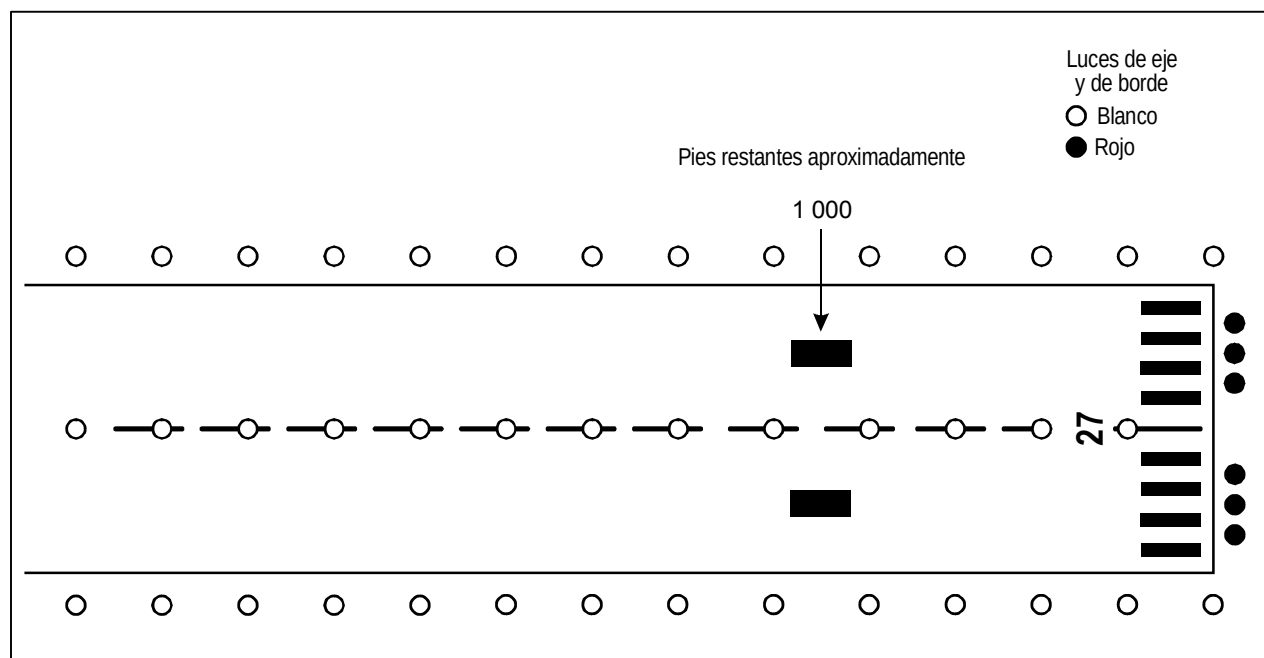


Figura 4-17. Señales y luces en una pista para aproximaciones que no sean de precisión de la FAA

(según *Wind Shear Training Aid* de la FAA, 1987, con adaptación por la OACI)

- d) El repliegue de los flaps durante la recuperación en la aproximación [como en el procedimiento normal de “motor y al aire”] reduce el margen hasta el accionamiento del sacudidor de palanca y tiene un efecto negativo en la capacidad de ascenso inicial de la aeronave.
- e) La utilización de la velocidad respecto al suelo con referencia inercial destaca el control de la velocidad, lo cual es contrario al método de recuperación recomendado. Además, este método de “velocidad respecto al suelo” tiene el propósito de compensar la cizalladura del viento y continuar la aproximación en lugar de iniciar inmediatamente la maniobra de recuperación. Aunque este método no es apropiado para encuentros con microdescendentes, puede ser apropiado para otros tipos de cizalladura del viento.
- f) El empleo del método de “picado” (descenso del morro de la aeronave para acelerar, encabritando luego a cierta altura mínima predeterminada) expone a la aeronave a vientos horizontales de intensidad posiblemente mayor, produce altitudes de recuperación mínimas más bajas, requiere altas velocidades de cabeceo y complica el procedimiento de recuperación.

Se recuerda que se logran los mejores resultados de recuperación mediante el control apropiado de la actitud de cabeceo en combinación con el empuje.

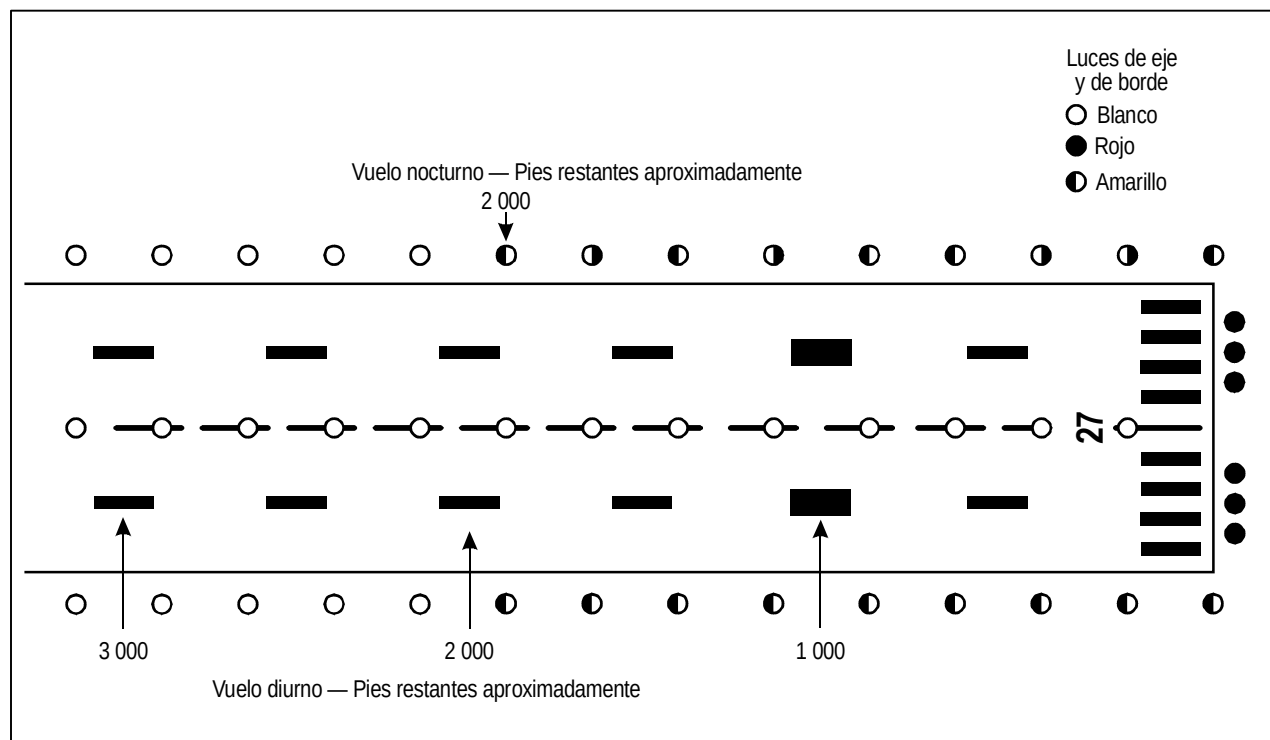


Figura 4-18. Señales y luces en una pista para aproximaciones que no sean de precisión de la OACI
(según *Wind Shear Training Aid* de la FAA, 1987, con adaptación por la OACI)

Referencias

1. Manningham, 1980: Staying current, a proficiency guide for serious pilots, Ziff-Davis Publishing Co., New York.
 2. Torosian, 1986: Wind shear, a pilot's point of view, McDonnell Douglas Corp.
 3. Federal Aviation Administration, 1987: FAA Wind Shear Training Aid, Volume II, Substantiating Data.
 4. Morrison, 1982: Wind shear refresher course, *Canadian Aviation*.
 5. Kermode, 1972: Mechanics of flight, Pitman Publishing (London, New York and Toronto).
 6. Melvin, 1980: What you don't know about wind shear can kill you, *Flight Crew*, Vol. 2, No. 3.
 7. Carter, 1977: Some comments on wind shear, *Aerospace Safety*.
 8. Fredrickson, 1977: Wind shear, an update, *Shell Aviation News*.
 9. Krauspe, 1985: Contributions on the subject of longitudinal movement of aircraft in wind shears, NASA Technical Memorandum NASA TM-77837.
 10. Roach and Findlater, 1983: An aircraft encounter with a tornado, *Meteorological Magazine*, Meteorological Office, London, United Kingdom.
 11. Federal Aviation Administration, 1987: FAA Wind Shear Training Aid, Volume I, Pilot Wind Shear Guide.
-

Capítulo 5

OBSERVACIÓN, PRONÓSTICO Y NOTIFICACIÓN DE CIZALLADURA DEL VIENTO A POCA ALTURA

5.1 OBSERVACIÓN DE LA CIZALLADURA DEL VIENTO — OBSERVACIONES EN TIERRA Y EN VUELO

GENERALIDADES

5.1.1 Con arreglo a la exposición de requisitos operacionales, debe comunicarse al piloto información sobre la cizalladura del viento a poca altura (véase el Apéndice 1). Esta observación puede proceder de observaciones (en tierra o en vuelo) o de pronósticos. El éxito con el que se desarrolló e instaló el TDWR y las mejoras significativas realizadas en los sistemas de detección y aviso de cizalladura del viento, basados en anemómetros, significan que se ha logrado la detección y observación operacionales en tiempo real de cizalladura del viento a poca altura mediante equipo terrestre. Sin embargo, dicho equipo perfeccionado es costoso para la compra y el mantenimiento y, por lo mismo, probablemente se limitará a aeropuertos de gran intensidad de tráfico que también estén afectados por cizalladura del viento y especialmente microrráfagas. En la mayoría de los aeropuertos se seguirá contando con una variedad de métodos de observación, principalmente indirectos, para detectar la presencia y, cuando sea posible, la intensidad de la cizalladura del viento.

OBSERVACIONES EN TIERRA

Observaciones visuales de cizalladura del viento

5.1.2 La cizalladura, contrariamente a sus efectos, no es visible. En la sección 4.3 se indican métodos para deducir su presencia basándose en otra información MET. Se enumeran a continuación algunos de sus indicios:

- a) capas de nubes adyacentes que se mueven en diferentes direcciones;
- b) penachos de humo cizallados que se mueven en diferentes direcciones;
- c) nubes rollo que preceden una línea de turbonada que se aproxima;
- d) vientos rafagosos fuertes en la superficie que agitan árboles, banderas, etc.;
- e) conos indicadores del viento en torno a un aeródromo que reaccionan a diferentes vientos;
- f) polvo^{a,1} (especialmente en forma de anillo) levantando por las corrientes descendentes que soplan por debajo de nubes de convección;

a. También se ha informado de la posible presencia de microdescendentes en condiciones de nieve, en cuyo caso, además de los consiguientes efectos de cizalladura del viento, también disminuyó la visibilidad debido a fuertes vientos en la superficie.¹

- g) polvo levantado en un frente de ráfagas que precede a una línea de turbonada;
- h) virgas cuando están especialmente relacionadas con nubes de convección;
- i) nube lenticular que indica la presencia de ondas estacionarias, etc.;
- j) nubes de embudo (tromba);
- k) trombas marinas;
- l) tornados.

Estos efectos de la cizalladura del viento no tendrían todos forzosamente importancia alguna para las aeronaves que aterrizan y despegan; este aspecto tendría que ser objeto de una evaluación caso por caso, basándose en las condiciones locales reinantes. Muchos de estos efectos son frecuentemente visibles en tierra al igual que en el aire y, como se indica en el Capítulo 4, podrían constituir indicios útiles para el piloto sobre posible cizalladura del viento.

Observación de la cizalladura del viento mediante instrumentos meteorológicos (MET) normalizados

5.1.3 *Anemómetros.* Se menciona en el Capítulo 2 la utilización de anemómetros para observar y medir la cizalladura del viento en el plano horizontal (p. ej., a lo largo de la pista). En muchos aeródromos, con objeto de proporcionar información sobre el viento en la superficie que represente tramos críticos de la pista, tales como áreas de despegue y zonas de toma de contacto, es preciso instalar varios anemómetros, lo que permite obtener información inmediata sobre la cizalladura horizontal del viento. Esto condujo a la realización de un sistema advertidor de cizalladura del viento especializado, es decir, el sistema de alerta de cizalladura del viento a poca altura (LLWAS)^b, (véanse 5.1.7 a 5.1.14 para más detalles). Algunos países han instalado también anemómetros teledetectores en mástiles y torres de televisión situados en las cercanías de un aeródromo con objeto de observar y medir la cizalladura del viento en el plano vertical. En Finlandia y Suecia, las instalaciones de este género, junto con captadores instalados en torres para detectar y medir la intensidad de las inversiones de temperatura a poca altura, son el elemento esencial de los sistemas advertidores de cizalladura del viento (véase 5.3.25). En Hong Kong (China)² se han instalado anemómetros en las colinas próximas a la trayectoria de aproximación al aeropuerto de Kai Tak (reemplazado en 1998 por el aeropuerto internacional de Hong Kong) para proporcionar información destinada a los avisos de cizalladura del viento.

5.1.4 *Sondeos con globos.* Otra forma de obtener información sobre cizalladura del viento es, evidentemente, mediante el lanzamiento de radiovientosondas y globos piloto. Sin embargo, como se ha mencionado en 2.5.3, cada uno de los vientos observados de este modo ya es un viento medio respecto a una capa y representa únicamente una muestra muy pequeña de la atmósfera en el espacio y el tiempo. El lanzamiento de una radiovientosonda permite también detectar las inversiones de temperatura a poca altura, lo que indica, en algunos casos, la presencia de cizalladura del viento (véase 3.1.5 en lo tocante a las corrientes en chorro a poca altura). Si bien los datos sobre el viento obtenidos mediante sondeos con globos serían sumamente útiles para indicar cizalladura del viento en perfil (vertical), es poco probable que estos datos sean muy útiles para detectar las cizalladuras del viento que acompañan a las nubes de convección (frentes de ráfagas, ráfagas descendentes, microdescendentes, etc.). Sin embargo, aun cuando los datos de los sondeos puedan ser de escasa utilidad operacional para la observación de cizalladura del viento, son sumamente útiles para pronosticar condiciones favorables a su formación (véase 5.2).

b. Para describir los sistemas actuales, se utiliza LLWAS en lugar de LLWSAS.

5.1.5 **Radar meteorológico terrestre.** El borde anterior de un frente de ráfagas, especialmente cuando éste lo ocasionan líneas de turbonada, es a veces visible en los radares meteorológicos convencionales (especialmente en los radares que funcionan en una longitud de onda de 10 cm y también de 3 cm) en la forma de arcos o líneas finas, pero muy definidas. Los ecos de este género suelen llamarse “ángeles radar”; aunque algunos de ellos pueden atribuirse a nubes de insectos o bandadas de aves, etc., en la mayoría de los casos se deben simplemente a fuertes gradientes de temperatura o de humedad que ocasionan cambios relativamente bruscos del índice de refracción de la atmósfera. Los ecos en arcos o líneas ocasionados por frentes de ráfagas marcan el borde anterior de las corrientes descendentes de aire frío y mantienen a menudo su identidad durante un período de hasta una hora en algunos casos a medida que se mueven de un lado a otro de la pantalla radar a la velocidad del frente de ráfagas. Sin embargo, no todos los frentes de ráfagas producen ángeles radar identificables, porque su formación parece depender de una combinación relativamente rara de variables atmosféricas y de reflectividad radar. Además, a distancias de más de 50 km (31 NM), la señal radar pasa por encima de los frentes de ráfagas relativamente bajos y, por consiguiente, no los puede detectar. No obstante, si se observa un frente de ráfagas y se sigue con el radar, el pronosticador puede pronosticar la manera y el momento en que afectará al aeródromo de que se trate (véanse 5.2.37 a 5.2.40). Existen varias técnicas de tratamiento radar que permiten a los meteorólogos evaluar la intensidad de los ecos de tormentas y deducir la probabilidad de que produzcan algunos o todos los fenómenos de cizalladura del viento peligrosos para la aviación. Estas técnicas se basan por lo general en el coeficiente de reflexión de la señal radar y en la representación de curvas de coeficientes de reflexión radar (dBZ).^c Una de estas técnicas, utilizada en los Estados Unidos y denominada sistema trazador de curvas de ecos radar, emplea un integrador y procesador vídeo automático (VIP). Las seis curvas que produce suelen llamarse niveles VIP (dBZ). Estos métodos se examinan más a fondo en 5.2.38. La exploración radar puede efectuarse en el plano horizontal [indicador panorámico (PPI)] o vertical [indicador de distancia y altitud (RHI)].

5.1.6 **Satélites meteorológicos.** Los frentes de ráfagas también se han observado con bastante frecuencia en las imágenes de los satélites meteorológicos. La característica más fácilmente observada es la nube rollo (stratus), que se forma frecuentemente por encima de la nariz de un frente de ráfagas, especialmente frentes de ráfagas que se forman a partir de líneas de turbonada (véase 3.5.10). Un buen ejemplo de imágenes de este tipo es el amplio arco de nubes que se desplaza radialmente hacia el exterior a partir de un racimo de nubes cumulonimbus, indicado en la Figura 5-1.³ Esta imagen plantea una dificultad porque, si bien la parte del arco L'L representa realmente una nube rollo (stratus) asociada al frente de ráfagas, al efectuar una comprobación de imágenes infrarrojas y visuales, la parte L'U del arco de nubes parece ser una nube cirrus.

Equipo diseñado para detectar y medir cizalladura del viento a poca altura

Sistema de alerta de cizalladura del viento a poca altura (LLWAS)

5.1.7 El sistema original LLWAS⁴ comprende cinco sensores del viento en la superficie situados en puntos estratégicos del perímetro del aeródromo, un sensor central del viento en la superficie con microprocesador y unidades de presentación visual que permiten verificar y comparar continuamente la diferencia vectorial entre las observaciones de los vientos en la superficie de la periferia y del centro del campo. Los sensores periféricos miden el viento instantáneo y cada diez segundos la dependencia central de control extrae muestras de las observaciones. El sensor central proporciona cada dos minutos el viento medio en la superficie con el cual se comparan los valores de los vientos en la superficie de la periferia.

5.1.8 Las dependencias ATC reciben presentaciones visuales e indican continuamente los vientos en la superficie del centro del campo y, según las velocidades del viento, un factor de ráfagas. La dependencia

c. La unidad dBZ significa decibelios de reflectividad.

de control compara constantemente el viento que sopla en la periferia con el viento del centro del campo y, si su diferencia vectorial es superior a 15 kt, también se presenta el viento periférico y se activa una alarma audiovisual. El controlador puede decidir en cualquier momento la presentación visual de uno o de todos los vientos periféricos.

5.1.9 El sistema LLWAS fue diseñado e instalado después de varios accidentes de aviación ocurridos a mediados de los años setenta y se instaló en más de cien aeródromos de los Estados Unidos. Inicialmente se destinó a detectar los frentes de ráfagas cuando cruzaban el perímetro del aeródromo y, desde este punto de vista, el sistema funcionó bien, aunque el nivel de falsas alarmas ha causado problemas (exceso de avisos). A raíz de investigaciones adicionales sobre cizalladura del viento a poca altura asociada con nubes de convección, quedó evidente que los frentes de ráfagas constituían únicamente parte del problema: el problema principal consistía en los precursores de dichos frentes que se forman por encima del nivel del suelo, o sea, ráfagas descendentes y microrráfagas, más bien que el propio frente. A este respecto, el LLWAS es limitado porque sólo puede detectar cizalladura del viento horizontal a nivel del suelo, lo que excluye la detección por la trayectoria de planeo o de ascenso inicial. Dada la resolución original temporal y espacial del sistema, las microrráfagas pueden fácilmente tener lugar entre dos sensores de perímetro sin afectarlos.

5.1.10 A fin de resolver estos problemas, el LLWAS fue objeto de tres mejoras importantes que mejoraron considerablemente su eficacia operacional, la frecuencia de falsas alarmas y su facilidad de mantenimiento. La mejora en la eficacia de observación se centró en ampliar la cobertura del sistema hasta 5,5 km (3 NM) alrededor de las áreas críticas, tales como las aproximaciones a la pista y los corredores de despegue, y proporcionar mayor capacidad para detectar microrráfagas. La ampliación de la cobertura significó un aumento en el número de sensores, que pasó del número original de cinco hasta 32 en el Aeropuerto internacional de Denver. Mejorar la detección de microrráfagas exigió que se elaborara un nuevo algoritmo que calculara la divergencia en triángulos de tres sensores y en los bordes de los triángulos entre los sensores. Dichos resultados se resuelven en componentes por las orientaciones de la pista y las estimaciones de ganancia o pérdida del viento de frente o de cola (véase 2.1.3). El cálculo de los modelos de divergencia por todo el sistema permitió detectar divergencia positiva generada por microrráfagas cuando alcanzan el nivel del suelo y divergencia negativa (convergencia) a lo largo de los frentes de ráfagas que atraviesan el aeródromo y por delante de los mismos. Esta información se convierte en los avisos de cizalladura del viento enviados a los pilotos. La divergencia no tiene interés para el piloto, de modo que en los avisos se indica la ganancia o pérdida estimada del viento de frente. Estas cizalladuras se calculan sobre trayectorias de vuelo de 4 km, con una pérdida de viento de frente superior a 30 km/h (15 kt), pero igual a, o menos que, 60 km/h (30 kt), indicándose, “cizalladura del viento con pérdida”. Una pérdida del viento de frente superior a 60 km/h (30 kt) sobre 4 km se indica como microrráfaga. Las cizalladuras sobre distancias superiores a los 4 km nominales se consideran un riesgo reducido por su carácter menos abrupto. Una ganancia del viento de frente de 30 km/h (15 kt) o más sobre 4 km se indica como “cizalladura del viento con ganancia”, representando áreas de convergencia (divergencia negativa) normalmente por delante y a lo largo de un frente de ráfagas.

5.1.11 Los algoritmos del LLWAS han sido generalmente eficaces [la última mejora importante ha sido el algoritmo de detección de cizalladura del viento y microrráfagas (WSMD)⁵], aunque se considera que otras mejoras son posibles, particularmente para detectar frentes de ráfagas. La eficacia de los algoritmos depende en gran medida de las cizalladuras de umbral seleccionadas y de la calidad de los datos de los sensores. A este respecto las falsas alarmas tienen importancia crítica, especialmente cuando activan la emisión de un aviso de microrráfaga que, a su vez, da lugar a importantes decisiones operacionales por parte del piloto. Un nivel elevado de falsas alarmas socava también la confianza en el sistema entre pilotos y controladores de tránsito aéreo. La cuestión de las falsas alarmas es más bien complicada y, hasta cierto punto, depende de cada aeródromo en particular. Las falsas alarmas pueden ser causadas por condiciones de viento con ráfagas, por emplazamientos menos que ideales de los anemómetros, p. ej., obstáculos respecto a ciertas direcciones (que pueden ser conocidos pero con imposibilidad de escoger otro emplazamiento), por anemómetros con lectura excesiva o insuficiente o que fallan, pero que siguen

insertando datos erróneos en el sistema. Todos estos factores son objeto de estudio,⁶ por ejemplo, señalándose mediante el soporte lógico los sensores que no funcionen bien y suprimiéndose los avisos correspondientes o remplazándose los sensores originales por anemómetros mejorados (véase más adelante).

5.1.12 El emplazamiento de los anemómetros en la red LLWAS en un aeródromo recibió serio examen desde el principio, como puede verse de las directrices al respecto en la Orden 6560.21^a de la FAA⁷. Dichas directrices abarcan estudios detallados relativos a los emplazamientos y referencia a factores pertinentes de carácter climatológico, ambiental, logístico y operacional en cada aeródromo. La selección de emplazamientos sufrió varias limitaciones, incluidos el acceso a los terrenos, la potencia y propiedad del aeródromo, etc., y a veces no podía utilizarse el emplazamiento ideal. Al principio, se trataba de cinco o seis anemómetros en cada aeródromo, pero en el último programa de mejoramiento dicho número aumentará para cubrir 5,5 km (3 NM) más allá de las pistas, lo que constituye una tarea logística importante. Además de la instalación de nuevos anemómetros, en dicho programa se examinará el emplazamiento y la altura de los anemómetros instalados en la fase anterior, reemplazándolos o elevándolos según

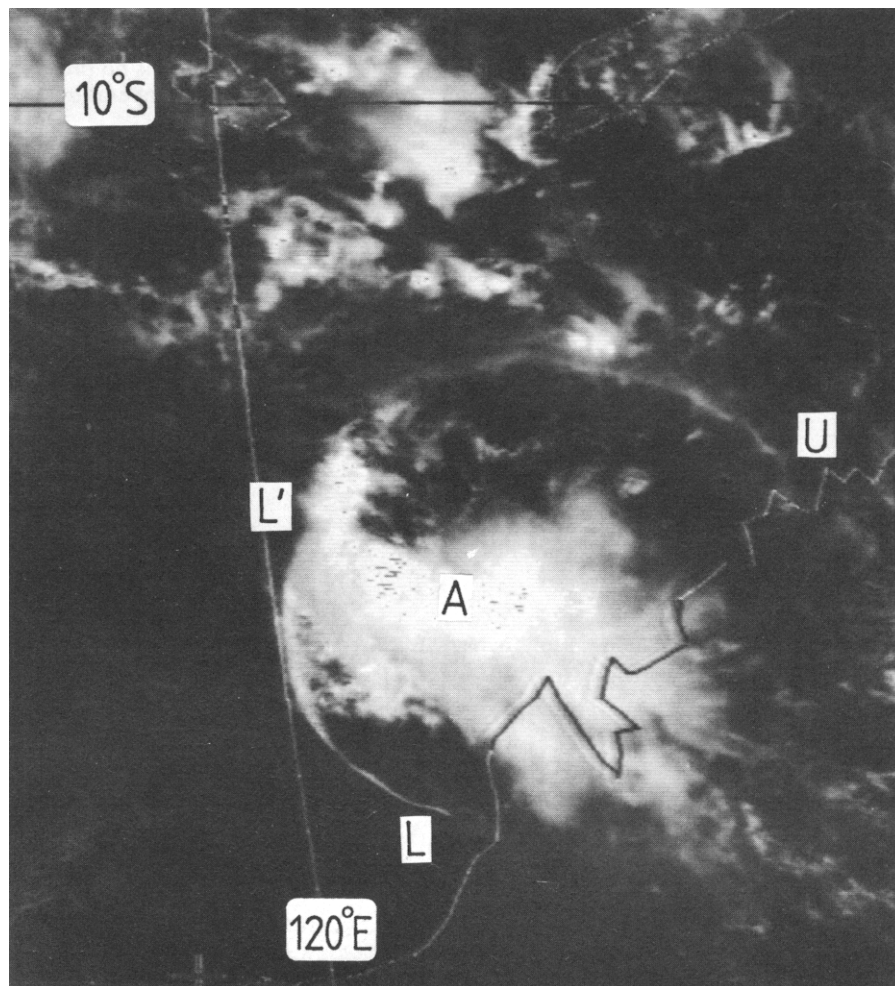


Figura 5-1. Imagen de satélite meteorológico que muestra nubes en arco
(según Kingswell, 1984)

correspondiera. Se estima que la mejora del LLWAS en todos los aeródromos en cuestión exigirá 200 mástiles de anemómetros que deberán desplazarse, reemplazarse o añadirse. Anteriormente, el sistema mejorado se llamaba desplazamiento y mantenimiento del LLWAS (LLWAS-RS),⁸ aunque en la documentación se utiliza ahora LLWAS-NE para indicar la ampliación de la red. Inicialmente, las plenas mejoras se aplicarán en ocho de los principales aeródromos de los Estados Unidos donde están instalados TDWR (véase más adelante).

5.1.13 Las mejoras no se limitarán al emplazamiento o a la instalación de nuevos anemómetros. Como se acaba de mencionar, una nueva tecnología, tales como los anemómetros acústicos, reemplazará los habituales anemómetros de pala. Estos nuevos sensores tienen mucha mayor fiabilidad y facilidad de mantenimiento, dado que son instrumentos de estado sólido. También se están perfeccionando las presentaciones en las dependencias ATC, utilizándose ahora terminales de presentación de cinta, lo que permite reemplazar las anteriores alertas de sector por alertas de cizalladura del viento y de microrráfaga (MBA) orientadas hacia las pistas. Además, los emplazamientos de los sensores adicionales pueden añadirse a las presentaciones ATC en el Aeropuerto internacional de Denver, que puede presentar los datos de 32 sensores. Para el LLWAS-RS se utilizarán, en la medida de lo posible, componentes disponibles en el mercado; se instalarán 40 sistemas operacionales y tres de apoyo. Cuando estén instalados el LLWAS-RS y el TDWR, se integrarán sus datos para la emisión de avisos. Este importante progreso se expone en detalle en 5.1.43.

5.1.14 Se han ensayado también sensores de presión (p. ej., microbarógrafos) como instrumentos de perímetro para detectar el “salto de presión” asociado debido al aire más frío de los frentes de ráfagas, etc., y, en algunas circunstancias, dichos sensores han detectado un frente de ráfagas que se aproxima hasta tres minutos antes de los sensores del viento en la superficie. Se han ensayado sensores combinados de viento en la superficie y presión y podrían utilizarse como complemento al sistema LLWAS.

Detección y telemetría por ondas sonoras (SODAR)

5.1.15 El sistema SODAR es análogo al radar, pero utiliza ondas sonoras (~ 1 500 Hz) para detectar las inversiones de temperatura a poca altura. El empleo de técnicas Doppler permite al sistema medir la velocidad y la dirección del viento a diferentes niveles de la atmósfera. A partir de los perfiles del viento, puede efectuarse el cálculo y la presentación de información sobre cizalladura del viento. Hasta hace poco, este sistema era imperfecto porque perdía eficacia en medios ruidosos (p. ej., aeropuertos) y en presencia de precipitaciones de intensidad superior a determinados valores. Estas limitaciones existen todavía en cierta medida, pero los valores umbral en los que empiezan a afectar a la eficacia operacional han sido elevados apreciablemente. Hasta ahora, los períodos de integración de los datos SODAR han sido del orden de 10 a 20 minutos, lo que es demasiado largo para poder expedir oportunamente avisos de cizalladura del viento de convección. Con las recientes mejoras se espera poder reducir estos períodos a menos de cinco minutos. Además, el empleo del SODAR triaxial permite ya medir la componente vertical del viento.

5.1.16 El equipo SODAR actual está limitado al estudio de la atmósfera directamente por encima del sitio de observación, aunque se está perfeccionando el haz sonoro del SODAR para que apunte a determinado ángulo, lo que permitiría la vigilancia continua de las tres componentes del perfil del viento a lo largo de las trayectorias de ascenso y de aproximación en los aeródromos.⁹ El equipo es especialmente apropiado para la observación de cizalladuras del viento que cubran toda un área y no sean transitorias, tales como las corrientes en chorro a poca altura que acompañan las fuertes inversiones de temperatura.¹⁰ El SODAR se utiliza operacionalmente en los aeródromos de varios países especialmente en el Canadá; Dinamarca, Francia, Hong Kong (China) y Suecia. Turesson y Dahlquist han informado sobre la utilización de varias instalaciones SODAR para observar y medir, con un período de integración de datos de 20 minutos, una ráfaga descendente en el Aeropuerto de Copenhague; la cizalladura del viento que se produjo en este caso se indica en la Figura 5-2.¹¹

Radar Doppler

5.1.17 Los radares meteorológicos convencionales calculan y presentan en la pantalla la distancia y dirección de los objetivos que reflejan el haz radar transmitido. El hecho de que el haz reflejado por los objetivos en movimiento difiere ligeramente en fase y frecuencia del haz transmitido y de que el desplazamiento de fase y frecuencia es proporcional a la velocidad del objetivo hacia y a partir del radar, sólo ha sido hasta ahora de interés incidental. Sin embargo, este fenómeno, llamado “desplazamiento Doppler”, permite eliminar en el radar ATC los objetivos estacionarios que tienen un efecto de enmascaramiento (ecos permanentes, tales como colinas) mediante circuitos indicadores de objetivos en movimiento (MTI). En los últimos 20 años, se ha venido utilizando cada vez más este desplazamiento Doppler para la medición del espectro de velocidad radial de los objetivos reflejantes en movimiento. El perfeccionamiento de estos radares Doppler coherentes de microondas no sólo ha sido rápido durante los últimos años sino que, lo que es aún más importante, ha progresado de modo que es posible analizar directamente las nubes tormentosas mediante la detección y seguimiento de las gotas de las nubes y la lluvia, el granizo y la nieve, así como trazadores en “aire claro”.¹² Esto ha permitido a los investigadores elaborar modelos tridimensionales muy perfeccionados de las tormentas y, en particular, ha contribuido a mejorar notablemente nuestra comprensión de los fenómenos conexos de frentes de ráfagas, microdescendentes y tornados, que son de interés primordial para la aviación.¹³

5.1.18 Con objeto de detectar los objetivos de interés MET, los radares meteorológicos suelen funcionar en longitudes de onda de 3 a 10 cm [siendo las más corrientes, p. ej., 3,2 (banda X); 5,5 (banda C); y 10 cm (banda S)]. En el caso de un radar Doppler, un objetivo con una velocidad radial de 1 m/s produce un desplazamiento de frecuencia de 62 Hz, 36 Hz y 20 Hz para longitudes de onda radar de 3,2, 5,5 y 10 cm, respectivamente. En 5.1.5 se indica que las heterogeneidades del índice de refracción en la atmósfera, tales como la interfaz entre el aire frío del frente de ráfagas y el aire ambiente más caliente pueden, a veces, detectarse y seguirse en forma de ángeles radar en los radares meteorológicos normales que funcionan en una longitud de onda de 3 cm. Se observó que los radares de una longitud de onda de 10 cm en onda continua y modulación de frecuencias (FM-CW) son especialmente aptos para detectar ángeles radar y turbulencia en aire claro (CAT).

5.1.19 En lo que atañe a la detección y medición de cizalladura del viento en los aeródromos, lo ideal es medir continuamente las tres componentes del viento hasta unos 500 m (1 600 ft) por encima del nivel del suelo (AGL) a lo largo de las trayectorias de aproximación y ascenso. Como ya se ha mencionado en 3.5.16, sólo la velocidad radial (a lo largo de los radios en dirección hacia el radar y a partir de éste) puede obtenerse de un solo radar Doppler. Naturalmente, si el radar efectúa una exploración vertical puede obtener información sobre la componente vertical del viento en dicho punto, es decir, sobre corrientes descendentes y ascendentes. Mediante una exploración azimutal a un ángulo de elevación dado, se obtiene una variación casi sinusoidal de la velocidad Doppler a medida que la antena efectúa su exploración contra el viento, a través del viento, en el sentido del viento y a través del viento en cada rotación. De estos datos es posible obtener perfiles del viento, suponiendo que los vientos sean uniformes en el área. A primera vista, esto no parece servir para detectar cizalladura del viento cuando es probable que el campo del viento no sea uniforme; sin embargo, se observó que muchos fenómenos que producen cizalladura del viento, tales como los frentes de ráfagas, microdescendentes y tornados, pueden reconocerse por su “signatura” en un solo radar Doppler (es decir, la configuración del gradiente de velocidad radial). Se han desarrollado a partir de los datos radiales del campo de propagación de un solo radar Doppler, algoritmos fiables que permiten detectar modelos de divergencia (+ve y -ve) causados por fenómenos de cizalladura del viento. En el TDWR se utiliza una serie de dichos algoritmos. Se trata de un radar Doppler de banda C, desarrollado especialmente para detectar frentes de ráfagas y microrráfagas. Esto se llevó a cabo paralelamente con la continuación de la investigación sobre algoritmos de detección y productos (datos de salida), beneficiándose de la contribución y los comentarios de todos los grupos de usuarios interesados.¹⁴ Además, al observar los niveles más bajos de la atmósfera, la señal del radar Doppler sigue siendo objeto de considerable deterioro debido a los ecos parásitos en tierra. Se indican a continuación las características técnicas del TDWR¹⁵:

- a) banda C con impulsos de 1,1 μ s de 250 kW en modo Doppler de frecuencias de repetición de impulsos (PRF) de 1 066–1 930 Hz;
- b) antena de haz estrecho con una anchura de banda de 0,5° y lóbulos laterales inferiores a –27 dB;
- c) exploración de volumen PPI por el aeropuerto cada 2,5 minutos, con exploración de la superficie cada minuto;
- d) supresión de ecos parásitos mediante filtros de paso alto, así como eliminación de residuos del objetivo en puntos y ecos parásitos en tierra;
- e) selección PRF para reducir al mínimo la contaminación de datos cerca del aeropuerto causada por ecos ajenos a la zona de exploración y eliminación de datos contaminados por condiciones meteorológicas fuera de la misma utilizando datos de exploración de baja PRF (325 Hz);
- f) procesamiento de la velocidad utilizando exploraciones dobles con diferentes PRF y continuidad bidimensional de los campos de velocidad;
- g) amplio uso de parámetros de adaptación de emplazamientos para los algoritmos de microrráfagas y frentes de ráfagas para lograr los mejores resultados en diversos entornos; y
- h) mensajes alfanuméricos de avisos de cizalladura del viento en presentaciones mediante cintas para los ATCO de la torre local y presentaciones de situación a colores para fines de planificación del área terminal por los supervisores ATC.

5.1.20 Los investigadores de la NCAR elaboraron los algoritmos MET del TDWR. En el algoritmo de microrráfagas del TDWR se utilizan datos radiales relativos a la velocidad a partir de la elevación más baja explorada. Esto permite detectar segmentos de velocidad radial en aumento a lo largo del haz radar y los reúne en grupos. Se supone que éstos estén asociados con microrráfagas, cuyo contorno irregular está constituido por la envoltura externa de dichos grupos. Una pérdida de viento de frente se estima luego para cada configuración y, según la pérdida estimada del viento de frente y el emplazamiento de la configuración respecto a los corredores de aproximación y despegue de la pista, se expide una alerta de “microrráfagas” o “cizalladura del viento con pérdida”, como se describe en 5.1.10. Para detectar los frentes de ráfagas, se utiliza una técnica similar determinando las regiones de convergencia radial, que se ajustan mediante una curva polinomial para representar el frente de ráfagas. Se estima la ganancia del viento de frente a través del frente de ráfagas y, según la ganancia [30 km/h (15 kt) o más] y si el frente afecta a los corredores de aproximación o despegue de la pista, se expide una alerta de “cizalladura del viento con ganancia”.¹⁶

5.1.21 Uno de los principales problemas con el radar Doppler consiste en la contaminación inevitable por las señales de retorno de ecos parásitos en tierra, que han sido y, hasta cierta medida, siguen siendo fuente de falsas alarmas. Se contrarresta este efecto utilizando mapas y polígonos de dichos ecos para sustraer señales significativas de objetivos terrestres estacionarios dentro del alcance del radar. Es difícil perfeccionar dichos mapas y esto varía de un aeropuerto a otro. Inicialmente, la eliminación de los ecos parásitos en tierra de la señal del TDWR deterioraba la entrada de señales y la eficacia global de los algoritmos de detección de cizalladura del viento, perdiendo así algunos avisos auténticos.¹⁷ Fue menester limitar la eliminación de ecos parásitos en tierra hasta lograr un equilibrio razonable entre dicha eliminación y el deterioro de la señal. Continúa la investigación para mejorar esta situación.¹⁸ El algoritmo de microrráfagas del TDWR ha demostrado una probabilidad de detección superior al 90% y una frecuencia de falsas alarmas de aproximadamente el 6%. Dicho algoritmo exige confirmación de la signatura de reflectividad, que señala nubes de convección, antes de validar la detección de una microrráfaga.

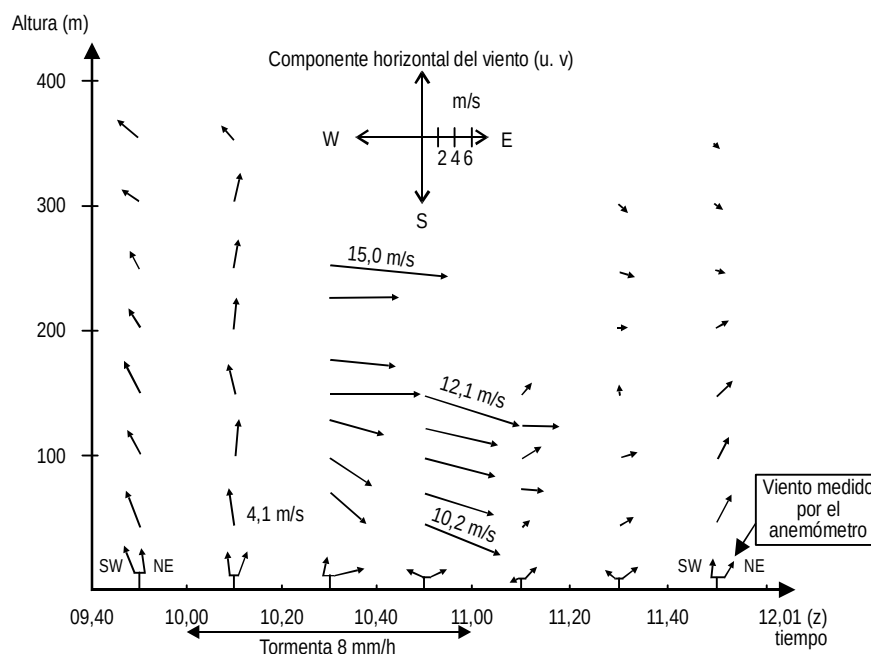
La mayoría de las falsas alarmas del TDWR se sitúan en la categoría de 30–50 km/h (15–25 kt) (o sea, cizalladura del viento con pérdida). A este respecto, la última versión del algoritmo de frentes de ráfagas del TDWR [algoritmo de frentes de ráfagas basado en inteligencia artificial (MIGFA)] tiene una probabilidad de detección del 85–95% para cizalladuras de 40 km/h (20 kt) o más, pero para cizalladuras en la gama de 30–40 km/h (15–20 kt), la frecuencia de falsas alarmas puede acercarse al 20%. Aunque éstas se sitúan en la categoría más ligera de cizalladuras, los avisos a los que dan lugar pueden, no obstante, persistir en un aeropuerto durante un período considerable, lo que es molesto, oneroso y contribuye a quitarle confianza al sistema. El MIGFA no exige la presencia de una signatura de reflectividad en altitud para validar la detección de un frente de ráfagas; la introducción de dicha validación plantea un dilema difícil porque los frentes de ráfagas pueden desplazarse por cierta distancia a partir de la nube cumulonimbus de la que proceden (véase 3.5.8); por consiguiente, la ausencia de una signatura de reflectividad no debería excluir la presencia de un frente de ráfagas. Continúa la investigación para determinar si puede reducirse la frecuencia de falsas alarmas en el caso de cizalladuras por debajo de los 50 km/h (25 kt).¹⁹

5.1.22 El TDWR, un radar de banda C, proporciona también información fiable sobre el tipo de precipitación en el aeropuerto, lo que permite proporcionar datos útiles para el ATC y los pilotos, además de los avisos (o alertas, como se dice en los Estados Unidos) de cizalladura del viento, tales como lluvia o llovizna engelantes y nieve. No obstante, eso también significa que el TDWR es muy susceptible a la atenuación debido a la lluvia, aún más que los radares de banda S, tales como el NEXRAD (radar meteorológico Doppler polivalente) y el canal meteorológico de radar ATC (ASR-9). Además, el TDWR es particularmente susceptible al deterioro de la señal debido a la lluvia que cae sobre su radomo. El soporte lógico del TDWR señala la atenuación normal de la señal de retorno (de la antena del radar hasta el objetivo y retorno), causada por la lluvia, pero la lluvia sobre el propio radomo da lugar a pérdidas aún mayores de señal (hasta 20 dB); se está investigando la mejor manera de que el soporte lógico señale este hecho y rebaje automáticamente ciertos umbrales basados en los valores de reflectividad del TDWR.²⁰

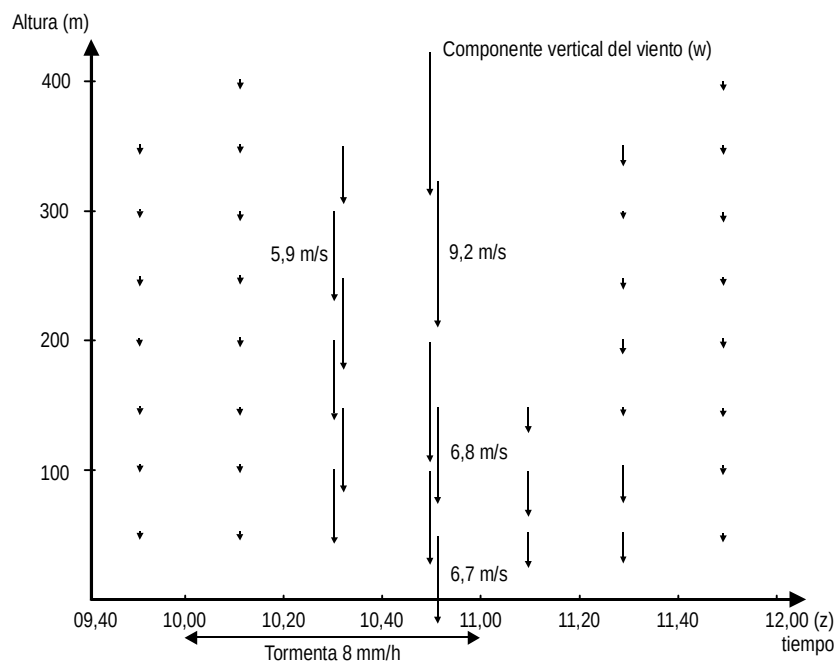
5.1.23 Se indica en 3.3 que la cizalladura del viento puede estar asociada con superficies frontales. Los algoritmos del TDWR han detectado la convergencia a poca altura debida a la cizalladura del viento de un frente frío, aun sin la presencia de nubes de convección. Sin embargo, ha habido unos pocos casos en que se ha detectado cizalladura de frente caliente, especialmente cuando la superficie frontal caliente está en altitud.¹⁶ Además, normalmente el sistema LLWAS no puede detectar una cizalladura de frente caliente. Lo que no es sorprendente, debido a las limitaciones inherentes a una red de anemómetros.

5.1.24 De lo expuesto resulta claro que el LLWAS y el TDWR tienen sus propios puntos fuertes y débiles. Además, como se mencionó anteriormente, el hecho de que produzcan falsos avisos tiende en gran medida a corresponder a diferentes categorías de cizalladura del viento, de modo que puede utilizarse uno de ellos para verificar al otro. En la Tabla 5-1 se indican otras ventajas e inconvenientes del TDWR y el LLWAS.

5.1.25 Por estos motivos, los sistemas LLWAS-NE fueron instalados primero en ocho aeropuertos que ya contaban con el TDWR. De ese modo, en teoría, cada sistema podía apoyar al otro con una ventaja global para los sistemas de aviso de cizalladura del viento del aeropuerto. Pese a ello, era operacionalmente poco práctico que proporcionaran en el mismo aeropuerto avisos de cizalladura del viento que podían ser diferentes. Mientras es posible desconectar el sistema que tenga la menor eficacia global, el apoyo que cada sistema proporcionaba a las deficiencias del otro favorecía una decisión diferente. Esto significaba que era necesario integrar los productos de ambos sistemas, lo que dio lugar a la elaboración de algoritmos perfeccionados de integración.



a) Componente horizontal del viento del 9 de junio de 1984 en el aeropuerto de Copenhague — medición por SODAR Doppler con un período de integración de 20 minutos



b) Perfil de la componente vertical del viento del 9 de junio de 1984

Figura 5-2. Medidas de cizalladura del viento mediante un SODAR Doppler en Copenhague (Dinamarca)
(según Turesson y Dahlquist, 1985, con adaptación por la OACI)

Tabla 5-1. Comparación de los datos y productos del TDWR y el LLWAS¹⁶

<i>Categoría</i>	<i>TDWR</i>	<i>LLWAS</i>
Resolución espacial	Elevada	Baja
Resolución temporal	Baja	Elevada
Medición de los datos de velocidad	Radial, 3D	2D
Información sobre reflectividad	Sí	No
Información por encima de la superficie	Sí	No
Cobertura de área	Grande	Pequeña
Posibilidad para pronosticar microrráfagas	Sí	No

5.1.26 Existían tres opciones para integrar la información procedente del TDWR y el LLWAS. En orden creciente de complejidad, se trataba de nivel de mensajes, nivel de productos y nivel de datos; se indican a continuación los atributos de cada nivel:

Nivel de mensajes. Los sistemas TDWR y LLWAS producirían avisos de cizalladura del viento independientemente para cada pista operacional. Estos avisos se combinarían para producir un aviso único para cada pista basándose en la lógica del caso más desfavorable. Esta opción es la más simple y podría implantarse rápida y fácilmente. Sin embargo, a pesar de que mantendría la mejor probabilidad de detección de los dos sistemas, la frecuencia de falsas alarmas tendería a ser más elevada porque no es fácil aprovechar la posible validación mutua entre el TDWR y el LLWAS, que es significativa, como ya se ha indicado.

Nivel de productos. Esta opción combinaría los resultados o “productos” del algoritmo intermedio y final para producir avisos de cizalladura del viento. Podría considerarse como un sistema “experto” con mutua validación de sistemas. Las ventajas abarcan la capacidad de simultáneamente aumentar al máximo la detección precisa y reducir al mínimo las detecciones imprecisas o falsas. No obstante, la interdependencia adicional entre los sistemas exige cuidado para evitar que se cancelen los avisos correctos y para tomar medidas respecto a los modos de falla. Además, la comparación de la información entre dos sistemas autónomos introduciría hipótesis algorítmicas y estadísticas, lo que podría causar problemas respecto a determinados casos.

Nivel de datos. La integración al nivel de datos brutos constituiría una tarea considerable y onerosa. Además, no se ha demostrado que podía efectivamente obtenerse una mejora respecto a las dos opciones anteriores, aunque era factible. Se ignoraba la mejor manera de sintetizar dichos datos bidimensionales y tridimensionales, que eran muy diferentes respecto al espacio y al tiempo.

5.1.27 Se decidió elaborar y ensayar algoritmos de integración basados en el nivel “mensajes” y “productos”; la integración a nivel de datos no se emprendió en esta etapa.²¹ Se ensayaron tres algoritmos, dos con integración a nivel de productos y uno a nivel de mensajes. El primer algoritmo a nivel de productos, elaborado en el NCAR, se llamó algoritmo de “nivel de productos prototipo”, en el que se trataba de reducir el número de falsos avisos de cizalladura del viento con pérdida suprimiendo las detecciones sobre cizalladuras del viento débiles del LLWAS que no estuviesen cerca de indicaciones adicionales de condiciones meteorológicas peligrosas, o sea, detecciones TDWR o LLWAS fuertes, o características TDWR detectadas en altitud. A raíz de esta evaluación, el algoritmo expide un aviso basado en la detección más fuerte indicada por el TDWR o el LLWAS para cada pista operacional. Este algoritmo prototipo se instaló y ensayó operativamente en el Aeropuerto internacional Stapleton de Denver desde 1988 hasta 1992.¹⁴ El segundo algoritmo de integración a nivel de productos, elaborado por el laboratorio Lincoln del Massachusetts Institute of Technology (MIT/LL), era similar al primero, pero aplicaba el procesamiento

simplificado. Trató de reducir los falsos avisos que procedían de los sistemas TDWR y LLWAS y los falsos avisos de microrráfagas eliminando las detecciones débiles que no se confirmaban independientemente por su proximidad a condiciones peligrosas. A raíz de esta evaluación, los avisos más fuertes producidos por el TDWR o el LLWAS se expiden para cada pista operacional. El algoritmo de integración a nivel de mensajes también fue elaborado en el MIT/LL.²² Se trataba de reducir los falsos avisos de tipo cizalladura del viento y de microrráfagas del TDWR y el LLWAS, más o menos del mismo modo que el algoritmo a nivel de productos del MIT/LL. Dado que este algoritmo funciona a nivel de mensajes, las únicas indicaciones de condiciones peligrosas procedían de los propios mensajes de avisos. Se eliminaban los avisos débiles del nivel de cizalladura del viento procedentes de un solo sistema y los avisos débiles de microrráfagas, procedentes de un solo sistema, se reducían a avisos de nivel cizalladura del viento. A diferencia de los algoritmos a nivel productos, cuando ambos sistemas expiden un aviso de cizalladura del viento con pérdida, la estimación integrada de la pérdida del viento de frente se deriva de una técnica de cálculo del promedio a fin de precisar la pérdida estimada del viento de frente.

5.1.28 La comparación de los tres algoritmos se basó en datos compilados en el emplazamiento del banco de ensayos del MIT/LL en el Aeropuerto internacional de Orlando. Los datos del LLWAS fueron compilados a partir de tres redes de anemómetros: un LLWAS de seis sensores, otro de nueve sensores y una mesonet de quince sensores. Las dos redes LLWAS eran normalizadas de fase II, pero se modificó el emplazamiento y la altura de los sensores, según correspondía. Se integraron los datos asíncronos procedentes de las tres redes correspondientes a diez días en registros de archivo síncronos de diez segundos mediante nuevo muestreo, conteniendo cada registro los vientos observados por el sensor para la totalidad de los 30 sensores, correspondientes a un período de diez segundos. Este modo de proceder era paralelo al plan de registro utilizado en el LLWAS-NE operacional (o de fase III, como se le conoce ahora). Se utilizó el radar del banco de ensayos del TDWR del MIT/LL para producir los avisos TDWR y se generó un campo de vientos de un Doppler doble utilizando datos adicionales del radar Doppler de la Universidad de Dakota del Norte. Se elaboró un algoritmo de detección de cizalladura del viento con un Doppler doble y se compararon los avisos que producía con los de los tres algoritmos de integración de ensayo. Había una diferencia fundamental entre el algoritmo a nivel de productos del NCAR y los dos algoritmos del MIT/LL en que en el primer caso no se utilizó la integración de la cizalladura en la trayectoria de vuelo, mientras que sí se hizo en el caso de los algoritmos del MIT/LL. Si bien los tres algoritmos produjeron buenos resultados, basándose en el amplio examen, evaluación, metodología y resultados de los ensayos, el NCAR y el MIT/LL formularon una recomendación conjunta a la FAA de que se seleccionara el algoritmo de integración a nivel de mensajes del MIT/LL como algoritmo de integración TDWR/LLWAS de la producción. Esta recomendación fue aceptada y el fabricante del TDWR (Raytheon) la incorporó en la quinta versión del soporte lógico del TDWR. El MIT y el NCAR realizaron luego ensayos operacionales en los aeropuertos de Orlando y Stapleton, respectivamente,²³ que indicaron que las ventajas de la integración TDWR/LLWAS eran mucho más importantes en el Aeropuerto Stapleton.

5.1.29 Estos desarrollos no eran aislados, dado que tuvieron lugar en los últimos 15 años, cuando la congestión en los aeropuertos y el espacio aéreo y las demoras de las llegadas y salidas empezaron a producir considerables limitaciones en los sistemas de aviación del mundo entero, especialmente en Norteamérica y Europa. Por consiguiente, era necesario examinar de nuevo todos los aspectos del sistema de aviación para determinar las posibilidades de mejoras, considerándose importante cada pequeña mejora adicional, dado que contribuía a mejorar globalmente la eficacia del sistema. Es bien conocido que las condiciones meteorológicas adversas y la calidad de las observaciones y pronósticos meteorológicos en general tenían un efecto importante sobre las demoras de las aeronaves, los cambios de rutas y la congestión consiguiente. Dada esta situación, en los aeropuertos focales de gran intensidad de tráfico en los Estados Unidos afectados gravemente por cizalladura del viento, cada uno de estos peligros MET no podía considerarse separadamente sino como parte de un sistema meteorológico integrado de aeropuerto.

5.1.30 La primera etapa consistía en asegurarse de que los pilotos en el área terminal tenían acceso, por medio de enlace de datos, a la misma información de avisos que se proporcionaba al ATC, procedente del TDWR, incluida la información sobre tormentas y cizalladura del viento. Este servicio recibió el nombre

de información meteorológica de área terminal para pilotos (TWIP). El MIT/LL elaboró en 1995 las especificaciones relativas al soporte lógico TWIP; el conjunto de soporte lógico fue construido por Raytheon y aceptado por la FAA en 1997¹⁹; el mismo año, la FAA y Aeronautical Radio, Inc. (ARINC) finalizaron la red correspondiente y los perfeccionamientos de las comunicaciones. Se prevé instalar TWIP en 45 aeropuertos de los Estados Unidos. Su uso depende de la decisión de cada línea aérea. Existen dos modos de utilizar el TWIP: petición/respuesta y envío/cancelación. Los mensajes TWIP se expiden cada minuto en condiciones meteorológicas adversas y, si no cada 10 minutos. Los pilotos que utilizan el método petición/respuesta reciben los mensajes más recientes; por consiguiente, sin una petición, no se actualizan los mensajes cuando ocurren cambios significativos en las condiciones meteorológicas. Los pilotos que utilizan el servicio envío/cancelación reciben todos los mensajes TWIP, incluidos aquéllos que señalan un cambio significativo. Este servicio utiliza el soporte lógico de distribución de la misma línea aérea, obteniendo los mensajes de una base de datos central. El inconveniente de recibir todos los mensajes TWIP consiste en que producen indicios sonoros y visuales en el puesto de pilotaje que incitan al piloto a buscar y leer los mensajes. Si éstos son frecuentes, causan molestia, particularmente durante los períodos de elevada carga de trabajo para la tripulación, cuando la aeronave esté a cierta distancia del aeropuerto. Además, los falsos avisos amplían el problema. Algunas líneas aéreas tomaron medidas adicionales para restringir la recepción de mensajes TWIP enviados a las aeronaves hasta 40 minutos de la hora prevista de llegada y durante el rodaje y el despegue. Por lo menos una línea aérea conserva todos los mensajes TWIP de modo que estén al alcance de los despachadores y meteorólogos, pero no envía los mensajes a las aeronaves por enlace ascendente que indiquen “ninguna tormenta en un radio de 24 km (15 NM)” y avisos de cizalladura del viento inferiores a 60 km/h (30 kt).

5.1.31 El servicio TWIP tomó el paso inicial para facilitar la toma de decisión de los pilotos proporcionándoles prácticamente la misma información MET en el área terminal que estaba al alcance del ATC. El paso siguiente consistió en mejorar el nivel y la calidad global de la información MET en el área terminal, integrando todos los datos disponibles y proporcionándolos al ATC y a los pilotos en un formato de fácil utilización. En el área terminal, el ATC necesita pronósticos y avisos precisos de fenómenos MET que afectan a la seguridad operacional, la planificación ATC a corto plazo y la mejor utilización de la capacidad de las pistas. Debe proporcionarse de manera rápida y fiable y en forma simplificada que idealmente elimina o reduce al mínimo toda interpretación por parte del ATC. A fin de lograrlo, la FAA inició el ITWS, cuya planificación empezó en 1991,²⁴ su pleno uso en 1995 y su uso operacional entre 2000 y 2004.²⁰

5.1.32 La cizalladura del viento constituye únicamente uno de los importantes fenómenos MET incluidos en el ITWS. Se proporciona a continuación una breve descripción del ITWS, destacándose la cizalladura del viento y los aspectos relacionados con esta última y lo que se supone que el sistema permita lograr:

- a) integración en tiempo real y plenamente automática de los datos meteorológicos procedentes de sensores explotados por la FAA, el servicio meteorológico nacional y las líneas aéreas;
- b) distribución de productos a las torres ATC, a los centros de aproximación (dependencias radar) y ATC en ruta, poniéndose los productos para el área terminal y en ruta al alcance de todos los usuarios; y
- c) presentaciones en tiempo real en las oficinas de las líneas aéreas (despacho de vuelo y control operacional central), con la misma capacidad que las presentaciones de la FAA, para facilitar la coordinación entre las dependencias de gestión del tránsito aéreo de la FAA y los despachadores de vuelo de las líneas aéreas con objeto de aumentar la eficacia y la seguridad operacional.

5.1.33 La fusión, en tiempo real, de los datos procedentes de estos múltiples sensores proporcionaría lo siguiente:

- a) pronósticos de cizalladura del viento y movimiento de las tormentas;
- b) información reticular sobre el viento en altitud para proporcionar estimaciones del tiempo de vuelo para la integración y puesta en secuencia del tráfico;
- c) información sobre la intensidad de las tormentas (p. ej., rayos, granizo y mesociclones); y
- d) solución dinámica de las deficiencias de un sensor en particular (p. ej., atenuación, falsas alarmas, cobertura limitada, limitaciones asociadas con los datos sobre velocidad radial).

En la Tabla 5-2 se indican los beneficios que traería la implantación eficaz del ITWS.

5.1.34 Las cizalladuras del viento más fuertes se asocian con tormentas fuertes. El objetivo del ITWS consiste en proporcionar productos al ATC para pronosticar el desarrollo, movimiento y disminución de las tormentas en el área terminal.²⁵ A este respecto, el pronóstico de condiciones meteorológicas de convección en el área terminal (TCWF)²⁰ fue elaborado y bien recibido por los usuarios en los Estados Unidos. Los atributos principales del TCWF abarcan actualizaciones frecuentes (cada seis minutos), elevada resolución espacial (1–2 km), elevada resolución en el tiempo de pronóstico (cada diez minutos) y establecimiento de la fiabilidad por el propio programa para proporcionar al usuario una medida cuantitativa de su precisión. En la Figura 5-3 se muestra un prototipo de presentación de los productos del TCWF, que fue ensayado en cuatro aeropuertos en 1999–2000 y fue bien recibido por los usuarios. Se considera que es muy eficaz para asistir a las dependencias ATC en lo siguiente:

- a) planificar de antemano los procedimientos para evitar condiciones meteorológicas de gran intensidad, así como las demoras en tierra durante el período de coordinación;
- b) permitir que las aeronaves regresen más rápidamente a las rutas normales, evitando así cambios de ruta innecesarios;
- c) evitar una reacción prematura al inicio de los cierres de aeropuertos a fin de que un mayor número de aeronaves evite las esperas en vuelo y las desviaciones del tráfico;
- d) seleccionar de manera más apropiada la posición para las esperas en vuelo en relación con condiciones meteorológicas adversas a fin de que, en cuanto éstas desaparezcan, se puedan establecer las mejores secuencias de aproximación y aterrizaje;
- e) cambiar las rutas para las llegadas a una mayor distancia del espacio aéreo terminal, evitando así las esperas en vuelo y las desviaciones del tráfico a altitudes menores; y
- f) aumentar las ventajas del ITWS que se indican en la Tabla 5-2.

Tabla 5-2. Beneficios de la implantación nacional en los Estados Unidos de una mejor toma de decisiones ATC utilizando los productos iniciales ITWS
(según Evans y Wolfson, 2000)

<i>Venatajas demostradas para el usuario</i>	<i>Beneficios (\$ millones al año)</i>
Mayor capacidad efectiva en los aeropuertos durante tormentas	18
Cierre o reapertura prevista en las áreas de llegadas y salidas	134
Repercusiones y cambios previstos en la pista	94
Mejor configuración del tráfico en el área terminal	10
Movimiento óptimo del tráfico	125
Mejor integración y puesta en secuencia utilizando datos sobre vientos en el área terminal	71
TOTAL	452

5.1.35 Las medidas descritas en 5.1.34 a) hasta f) representan una serie de mejoras posibles para los algoritmos de detección de cizalladura del viento. Una mejora que ya se ha llevado a cabo en el algoritmo original de microrráfagas introdujo la validación de una detección de microrráfagas utilizando la reflectividad en altitud, específicamente el contenido de líquido integrado verticalmente (VIL) de agua, para reducir el número de falsas alarmas. Sin embargo, en determinadas situaciones los entornos bajo las nubes pueden también producir microrráfagas con muy baja reflectividad en altitud (véase la Figura 3-13). En tales casos, la prueba del umbral VIL podría invalidar una detección válida de microrráfagas. Limitándose a reducir el umbral VIL sólo aumenta la frecuencia de falsas alarmas en numerosos casos. El método preferido consiste en reducir la *selectividad* del umbral del VIL.²⁶ Varios aeropuertos importantes en los Estados Unidos cuentan con más de un radar Doppler en el área terminal o cerca de la misma. Podrían mejorarse considerablemente los pronósticos de cambios del viento debido a frentes de ráfagas, por ejemplo en estos aeropuertos, si se combinaran los datos procedentes de todos los radares Doppler en el área terminal y se proporcionarían al ATC como un mosaico.

5.1.36 El objetivo siguiente que traería mejoras considerables a la seguridad operacional y la eficacia consistía en elaborar un algoritmo para pronosticar de manera automática, precisa y oportuna el desarrollo de frentes de ráfagas y microrráfagas en el área terminal. Esto constituía una parte importante del ITWS, incluidos productos concretos de predicción que fuesen apropiados para el ATC. El algoritmo de predicción de microrráfagas del ITWS, elaborado por MIT/LL, se basaba en los principios físicos fundamentales de la evolución de tormentas y el desarrollo de corrientes descendentes. Se utilizan datos de reflectividad reticulares tridimensionales, junto con la estructura de la temperatura ambiente (altura del nivel de engelamiento y gradiente adiabático en el nivel inferior), emplazamiento y movimiento de las tormentas y frecuencia total de los rayos, etc.²⁷ El algoritmo de predicción de microrráfagas del ITWS proporciona un aviso de dos a tres minutos de una microrráfaga, antes de recibirse el aviso del TDWR. En la Tabla 5-3 se enumeran productos prototipos del ITWS.

5.1.37 Los algoritmos de detección y predicción de microrráfagas del ITWS utilizan datos de precipitación del TDWR y datos sobre temperatura procedentes de observaciones en la superficie y en altitud y de aeronaves comerciales. En la torre ATC y la aproximación radar se presentan avisos gráficos sobre la situación. El ATC transmite al piloto mensajes de textos oralmente. El algoritmo proporciona también el ritmo y el alcance de los cambios en la velocidad del viento.

5.1.38 El producto combinado sobre frentes de ráfagas y cambios del viento del ITWS proporciona al ATC el emplazamiento y la intensidad de los frentes de ráfagas detectados, así como pronósticos sobre el movimiento de estos últimos y los cambios en el viento en la superficie asociados a través de las pistas. El algoritmo²⁸ utiliza reflectividad radar, datos de velocidad Doppler y datos sobre el viento de referencia, junto con análisis de líneas finas de la configuración de reflectividad y análisis de las líneas de convergencia detectadas a partir del mapa de velocidad Doppler. Se sigue cada frente de ráfagas y, basándose en su velocidad y dirección estimadas, se pronostican las futuras posiciones. Esta información se actualiza aproximadamente cada cinco minutos. Cuando un frente de ráfagas atraviesa una pista en uso y la cizalladura del viento es superior a 15 kt, el ATC transmite un aviso a los pilotos. En la Figura 5-4 se indican los productos característicos del ITWS que se presentan al ATC.

5.1.39 En los párrafos precedentes se describen el desarrollo y uso de TDWR automatizado en los Estados Unidos, donde se elaboró inicialmente el sistema. Se ha instalado también un sistema TDWR en el nuevo aeropuerto internacional de Hong Kong (HKIA) en Chek Lap Kok para proporcionar avisos de cizalladura del viento y turbulencia. El área terminal alrededor del aeropuerto internacional Kai Tak, reemplazado por el HKIA en julio de 1998, tenía un problema de cizalladura del viento y turbulencia que se había resuelto instalando una red de anemómetros en las colinas circundantes. Durante la planificación para el nuevo HKIA, los análisis MET del emplazamiento del aeropuerto indicaron que sería objeto de cizalladura del viento de nubes de convección y cizalladura del viento y turbulencia ocasionadas por el terreno.²⁹ Por consiguiente, en 1993, el Gobierno de Hong Kong (China) otorgó un contrato para el desarrollo de un sistema operacional de aviso de cizalladura del viento (OWWS) con los algoritmos necesarios. El OWWS se instaló en 1997 y ha funcionado con éxito desde entonces (véase el Apéndice 4).

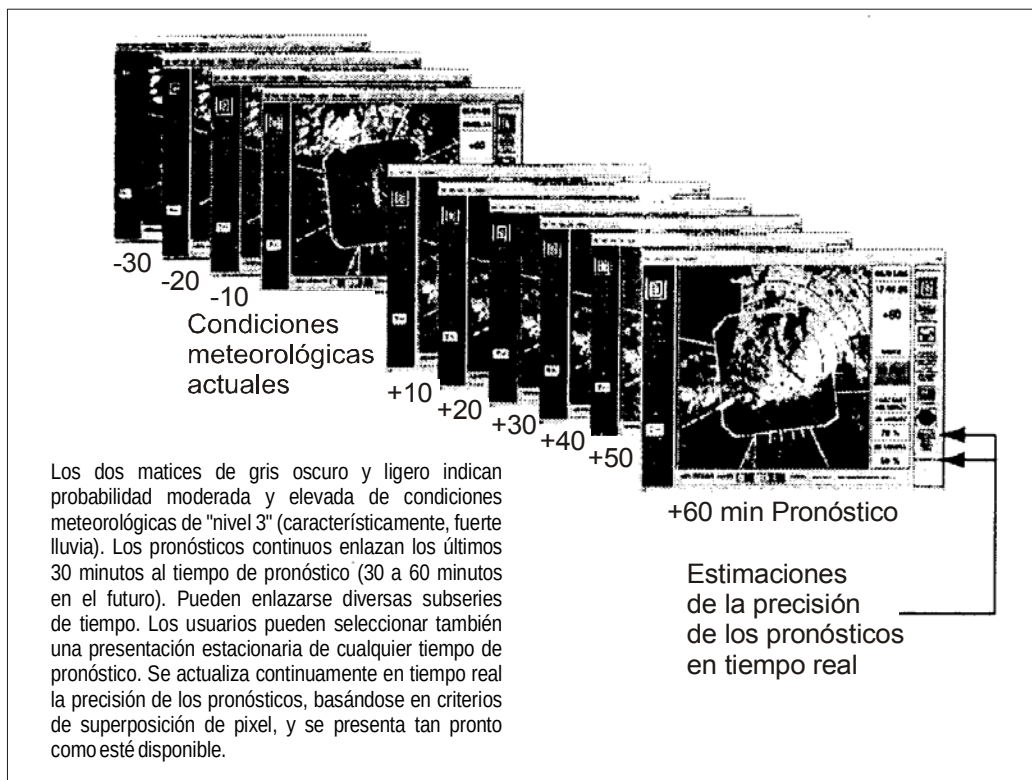


Figura 5-3. Concepto de presentación prototipo para el pronóstico de condiciones meteorológicas de convección en el área terminal
[Reproducido con autorización del Lincoln Laboratory del MIT, Lexington (Massachusetts).]

Tabla 5-3. Productos prototipo actuales del ITWS³⁰
(según Nierow, Showalter y Sanders, 1999)

<i>Cizalladura del viento</i>	<i>Precipitación</i>	<i>Generalidades</i>
Detección/pronóstico de microrráfagas	Tormenta	Detección de tornados
Detección/pronóstico de frentes de ráfagas	Movimiento de la tormenta	Rayos
Estimación del cambio del viento en la superficie	Posición extrapolada	Vientos según el LLWAS
Cronometría	Información sobre células de tormentas	Vientos en el ascenso y descenso en el área terminal
Emplazamiento e intensidad de las tormentas		Mensaje de gráficos para el piloto con texto o caracteres

5.1.40 Se han elaborado también sistemas integrados semejantes al ITWS en otros Estados, entre otros Alemania, Francia, el Japón, el Reino Unido y Suecia, pero no tienen una función principal en la detección de cizalladura del viento en los aeropuertos. Estos sistemas se describen más apropiadamente como sistemas integrados de previsión inmediata que combinan datos MET procedentes de numerosas fuentes diversas para proporcionar pronósticos y avisos a corto plazo. Utilizan datos procedentes de varias

combinaciones de radar Doppler, perfilógrafos, radiómetros de microondas multicanales de exploración basados en satélites, satélites meteorológicos, sistemas de observación de la superficie en la mesoescala y observaciones en altitud, etc.

5.1.41 Estos sistemas combinan, en una imagen compuesta, datos radar digitalizados a partir de una red radar organizada (convencional o Doppler) y superponen estos datos sobre el estado atmosférico actual procedentes de satélites meteorológicos, radiovientosondas y redes de observación de mesoescala, etc. Los datos combinados se presentan visualmente al analista en tiempo real y virtualmente en cualquier configuración que se desee. El analista puede intervenir interactivamente mediante el teclado de presentación para producir previsiones inmediatas. En la Figura 5-5 se presenta un ejemplo de productos actuales de previsión inmediata elaborados por Météo-France para uso por los ATCO. A partir del aspecto de la cizalladura del viento, estos sistemas asisten de manera importante para pronosticar tormentas fuertes y proporcionar así un marco mejorado para los pronósticos locales de la cizalladura del viento a poca altura asociada con dichas tormentas. Es también posible que, durante el uso de dichos sistemas, reconocer y clasificar determinadas configuraciones o firmas precursoras de cizalladura del viento, lo que finalmente tendría repercusiones directas en los pronósticos de cizalladura del viento.

5.1.42 además del radar Doppler y los diversos sistemas integrados que se basan en el mismo, varios fabricantes privados de equipo MET han emprendido diversas estrategias relativas al radar Doppler. Por ejemplo, el radar Doppler infrarrojo evita gran parte del problema de los ecos parásitos en tierra y los problemas de los lóbulos laterales y se presta particularmente para la detección de microrráfagas secas (o sea, presencia de pocos elementos de identificación en la atmósfera). Estos “radares” funcionan en longitudes de onda que se acercan al espectro visual y a menudo se llaman LIDAR Doppler (fotodetección y telemetría). En varios Estados se ha logrado considerable progreso en la elaboración de sistemas LIDAR Doppler terrestres de ondas infrarrojas continuas que pueden medir vientos tridimensionales hasta una altura de 6 a 8 km (20 00 a 26 00 ft). Debido al haz estrecho y colimado, las mediciones del LIDAR quedan menos afectadas por los ecos parásitos en tierra, lo que permite que se obtengan datos a unos pocos metros de la superficie. En Alemania se desarrolló un sistema de este tipo que se presta particularmente a mediciones continuas del perfil del viento en tiempo real y, por ende, para vigilar numerosos tipos no convectivos de cizalladura del viento, tales como corrientes en chorro a poca altura.³¹ Sea cual fuere la estrategia que se seleccione, siempre constituirá un compromiso, dado que cada serie de frecuencias y longitudes y ondas radar tiene ventajas e inconvenientes inherentes.

Perfilógrafos

5.1.43 Pueden realizarse mediciones continuas de los vientos (sus tres componentes) hasta la tropopausa de VHF Y UHF de radares Doppler.³² Entre ambos tipos, el perfilógrafo radar Doppler UHF es más apropiado para medir los vientos en la capa límite casi en tiempo real y proporcionar perfiles horarios del viento en las cercanías del aeródromo. Los perfilógrafos revisten considerable interés desde el punto de vista de la investigación porque su posibilidad de aumentar y tal vez reemplazar la red radioviento actual a un costo repetitivo menor, produciendo al mismo tiempo perfiles del viento más frecuentes y de resolución más elevada, podría revolucionar los pronósticos en la mesoescala. Los perfilógrafos son útiles para detectar y vigilar cizalladura del viento no transitoria, como la que acompaña a las corrientes en chorro a poca altura y la cizalladura del viento ocasionada por el terreno. Sin embargo, aparte del hecho de que proporcionan datos adicionales para pronosticar tormentas fuertes, etc., no permiten detectar cizalladura del viento de convección a lo largo de las trayectorias de aproximación y despegue. Varias instituciones de investigación, particularmente en los Estados Unidos, han instalado perfilógrafos radar Doppler VHF y UHF para fines de ensayo y los resultados son muy alentadores. Además, un perfilógrafo forma parte integrante del OWWS del aeropuerto HKIA en Chek Lap Kok, que se describe en 5.1.39 y en el Apéndice 4. Francia también tiene un perfilógrafo VHF en el aeropuerto Nice Côte d'Azur, que es muy útil para las dependencias ATC. En la Tabla A5-1 del Apéndice 5 se proporciona información acerca de los datos brutos y la visualización.

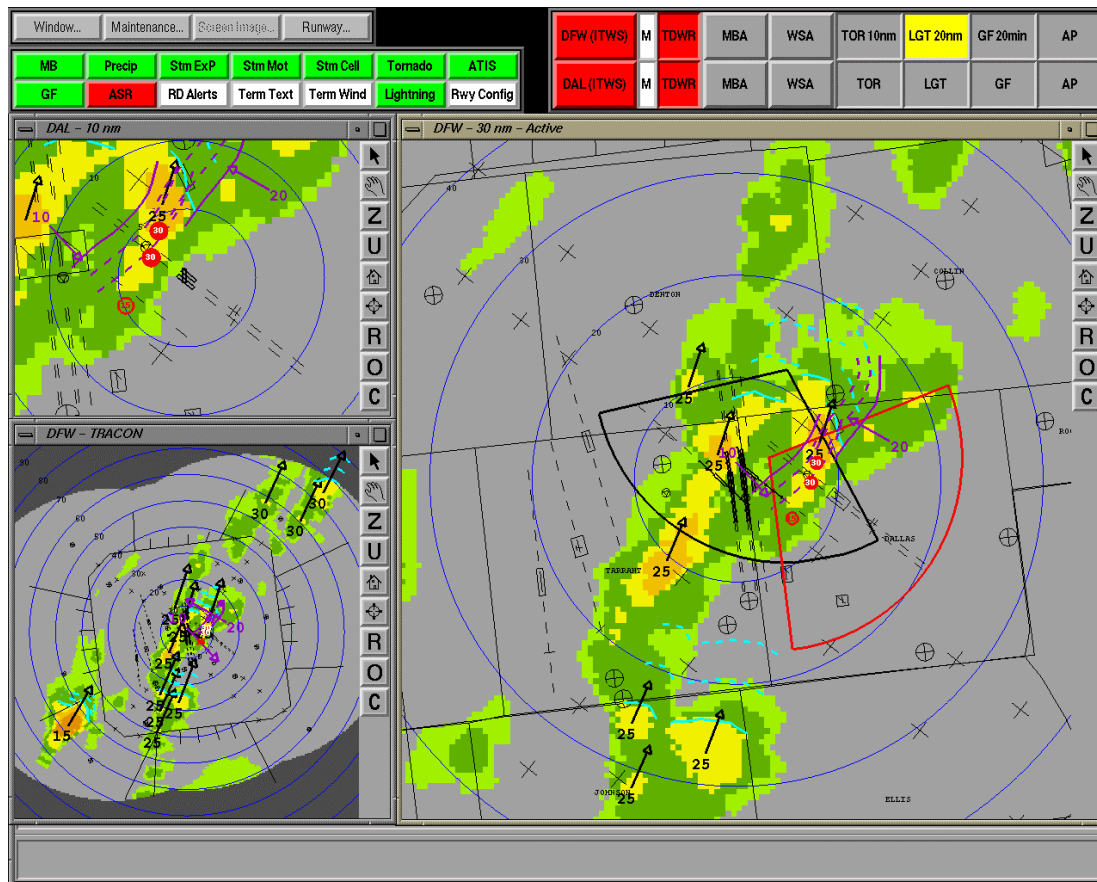


Figura 5-4. Ejemplos de sistemas meteorológicos terminales integrados
(según “Role of ITWS in the Modernization of the National Aerospace System”,
Octava Conferencia sobre aviación, telemetría y meteorología aeroespacial)

OBSERVACIÓN AÉREA DE CIZALLADURAS DEL VIENTO

Empleo de instrumentos corrientes del puesto de pilotaje

5.1.44 El empleo de instrumentos corrientes del puesto de pilotaje para observar la cizalladura del viento se ha examinado en detalle en el Capítulo 4 en relación con el reconocimiento de la cizalladura del viento por los pilotos. Se mencionó que podía obtenerse una indicación de la presencia de cizalladura del viento del indicador de velocidad relativa, indicador de velocidad vertical y altímetro instalados a bordo de todas las aeronaves y, en las aeronaves que los llevan, del indicador de actitud, indicador de situación horizontal, sistema advertidor de proximidad del suelo (el modo 1 indica una velocidad de descenso excesiva y los modos 3 y 5 una pérdida de altitud después del despegue y una desviación por debajo de la pendiente de planeo, respectivamente), del sistema advertidor de pérdida (sacudidor de palanca) y de las lecturas de la velocidad respecto al suelo y de la velocidad y dirección del viento proporcionadas por el sistema de navegación inercial (INS).



Alerta y previsión inmediata de tormentas y áreas de convección para controladores de tránsito aéreo

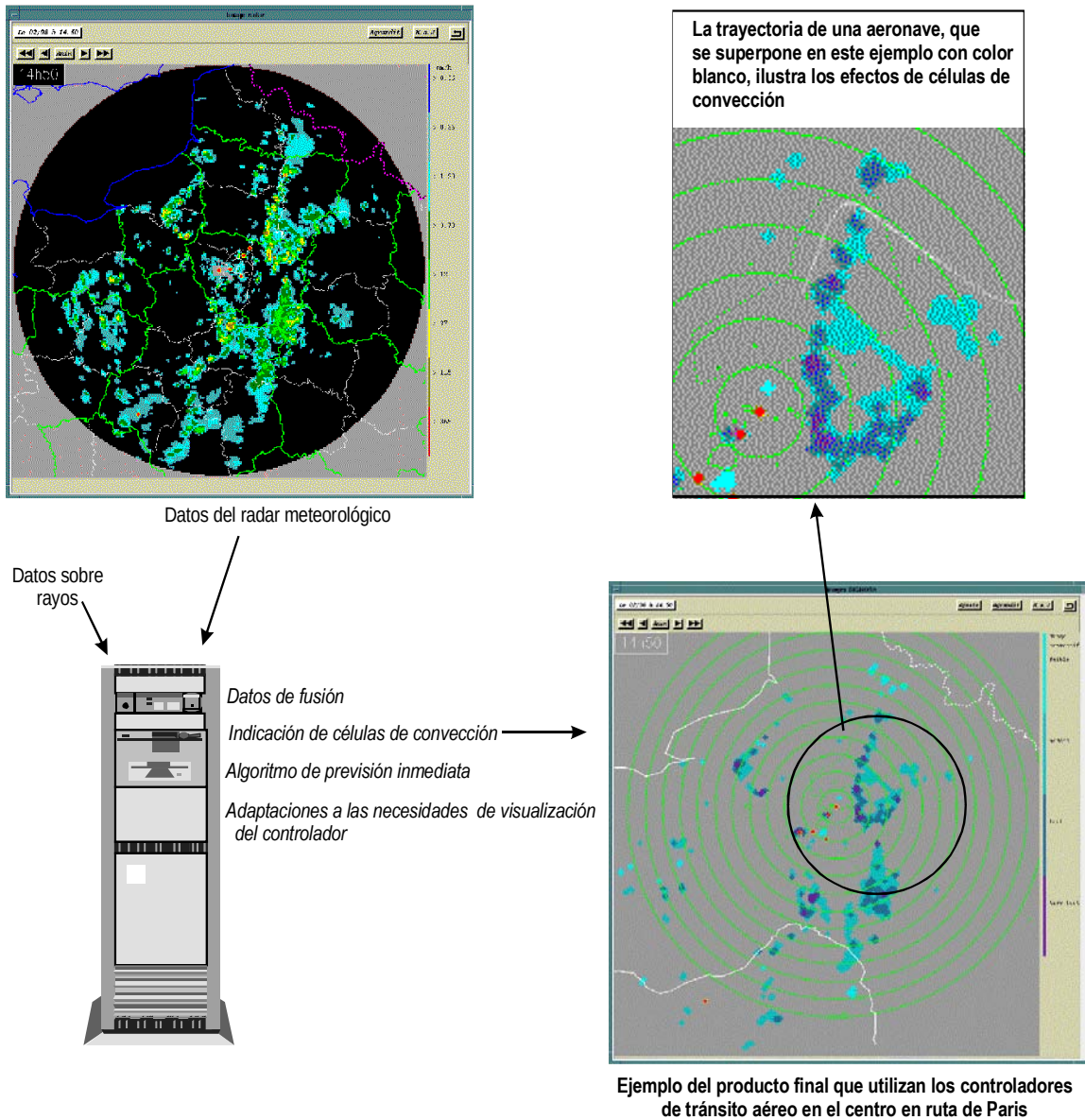


**Figura 5-5. Alerta y previsión inmediata de tormentas
y áreas de convección para controladores
de tránsito aéreo
(según Météo-France)**

Advertidores de a bordo de cizalladura del viento

Sistemas advertidores de cizalladura del viento basados en la vigilancia de la actuación de la aeronave

5.1.45 Uno de los sistemas más viejos que funciona eficazmente utiliza los datos de los sensores convencionales de a bordo tales como el tubo de pitot (velocidad aerodinámica), giróscopo vertical (actitud en cabeceo) y sensor advertidor de pérdida (ángulo de ataque), junto con otros datos suplementarios procedentes de acelerómetros horizontal/vertical especiales que forman parte del propio sistema advertidor. Utilizando estos datos, la computadora del sistema calcula instante por instante la cizalladura en las componentes verticales y horizontales del viento y, teniendo en cuenta las medidas compensatorias que puede tomar el piloto, el sistema presenta la pérdida o ganancia de energía debida a la cizalladura y, a un umbral fijado de antemano, produce una alerta sonora. El umbral se fija en un valor de 3 kt/s para una pérdida de viento de frente o una ganancia de viento de cola o (en una corriente descendente) en un valor de 0,15 radianes (8,6°) para una reducción del ángulo de ataque o en cualquier combinación de los dos que proporcione un nivel de señal equivalente (deceleración de 0,15 g).

5.1.46 Otro sistema que se encuentra en el mercado desde 1986, proporcionaba medios de detección y advertencia de cizalladura del viento en el marco de un sistema de control de la actuación. Este sistema se desarrolló en dos fases, la fase I destinada a la elaboración de componentes de detección y alerta y la fase II destinada a proporcionar indicaciones al piloto. El sistema utiliza la información obtenida de los sensores de datos aéreos, así como de los acelerómetros especializados que forman parte de la computadora de gestión de la actuación. Las entradas de datos comprenden el ángulo de cabeceo, ángulo de ataque, velocidad verdadera, aceleración vertical y longitudinal. La computadora del sistema compara continuamente la aceleración inercial y la aceleración de la masa de aire, así como el ritmo de variación de estas aceleraciones relativas, que permite advertir a la tripulación de vuelo acerca de desviaciones importantes que indiquen la presencia de cizalladura del viento.

5.1.47 Ambos sistemas mencionados en 5.1.45 y 5.1.46 se llaman equipo de detección y evasión de cizalladura del viento de tipo "reactivo" (de reacción) porque sólo pueden avisar al piloto acerca de la presencia de cizalladura del viento cuando la aeronave entra en dicho fenómeno. No obstante, aun con esta limitación, permiten detectar y avisar acerca de cizalladura del viento unos pocos segundos vitales antes del momento en que normalmente el piloto reconocería la situación. Paralelamente con el desarrollo del equipo, a principios de los años ochenta, la FAA inició la elaboración de criterios de aeronavegabilidad para la aprobación de sistemas de a bordo de aviso de cizalladura del viento en las aeronaves de transporte, así como criterios para su aprobación operacional que, finalmente, se publicaron como circulares de asesoramiento en 1987.³³ En dichas circulares se proporcionaba orientación para la certificación en lo que atañe a la aeronavegabilidad del equipo de a bordo de aviso de cizalladura del viento, de tipo reactivo, de categoría tanto de "aviso solamente" y "aviso con orientación para la evasión".

5.1.48 A fin de caracterizar plenamente las repercusiones de la cizalladura del viento en la actuación de las aeronaves desde el punto de vista de la energía cinética y potencial en tiempo real, se elaboró, basándose en los trabajos de Bowles³⁴, un índice no dimensional para cuantificar la amenaza de cizalladura del viento en comparación con los datos de actuación de la aeronave procedentes de los sensores y computadoras de a bordo. Después de ensayos llevados a cabo por la NASA y la FAA, se adoptó este índice como base para certificar los sistemas de a bordo de aviso de cizalladura del viento. Dicho índice se derivó de las ecuaciones de vuelo descritas en la Figura 4-1 y la ecuación habitual de la energía (cinética más potencial). La energía específica total (E_T) de la aeronave se define así:

$$E_T = z + \frac{1}{2} \frac{V_a^2}{g}$$

siendo V_a la velocidad relativa, g la aceleración gravitatoria y z la altitud por encima del terreno. En esta ecuación^d se utiliza la energía cinética de la masa de aire, dado que la velocidad relativa (y no la velocidad respecto al suelo) describe la capacidad de la aeronave de ascender y mantener su altitud. En el caso de la energía potencial, la altitud por encima del terreno puede intercambiarse por la velocidad relativa y viceversa (véase 4.2.7). El cambio del ritmo temporal de E_T , o la velocidad vertical de ascenso potencial de la aeronave, es el diferencial y puede equipararse a la entrada de energía de la aeronave procedente del empuje y la resistencia al avance (véase la Figura 4-1), como se indica a continuación:

$$\dot{E}_T = \dot{z} + \frac{V_a}{g} \dot{V}_a = V_a \frac{(T-D)}{W}$$

La ecuación que precede se aplica únicamente a una masa de aire uniforme. Si se tiene en cuenta la corriente del viento, y se descuidan los términos de segundo orden, la relación puede escribirse^d del modo siguiente:

$$E_T = V_a \frac{(T-D)}{W} - \frac{\dot{U}_x}{g} + \frac{w}{V_a} = V_a \frac{(T-D)}{W} - F, \text{ donde } F = \frac{\dot{U}_x}{g} + \frac{w}{V_a}$$

F es el índice sin dimensiones que combina $\dot{U}_x$, la componente horizontal del viento a lo largo de la trayectoria de vuelo, de aquí $\dot{U}_x$ es el ritmo de cambio de la componente horizontal del viento o el término de la cizalladura del viento, y “ w ” la componente vertical del viento (corriente ascendente o descendente dentro de la masa de aire). El factor F o índice, un parámetro definido por Bowles, representa los términos del campo de viento de importancia para la respuesta de la aeronave a la cizalladura del viento y se utiliza para definir los valores de umbral de cizalladura del viento peligrosos en el equipo de a bordo de aviso de cizalladura del viento. De las ecuaciones precedentes se observa que un factor F +ve disminuye el estado de energía de la aeronave, lo que ocurre para una masa de aire descendente (w es -ve) y para un viento de cola en aumento o un viento de frente en disminución (o sea, $\dot{U}_x$ es +ve). Como se describe en el Capítulo 4, en una cizalladura del viento en disminución, donde F es +ve, el piloto puede mantener o ganar altitud añadiendo empuje o elevando el cabeceo (de ese modo intercambiando la velocidad relativa por la altitud o la energía cinética por la potencial).

5.1.49 Las ecuaciones que se analizan en 5.1.48 describen el efecto instantáneo de la cizalladura en una aeronave y deben, por consiguiente, integrarse en una longitud de escala apropiada a fin de que caracterice plenamente el peligro que representa la cizalladura del viento. Por ejemplo, valores muy elevados del factor F pueden ocurrir sobre una longitud limitada y se acercan más a la turbulencia. La longitud de escala por la que existe cizalladura del viento es, por consiguiente, crítica y objeto de muchas investigaciones³⁵ (véase 2.5.2). Basándose en éstas, la FAA adoptó la longitud de escala de 1 km y un factor F medio de 0,13 o más para el umbral de alerta. Para la certificación de equipo de a bordo de aviso de cizalladura del viento, la FAA considera la cizalladura del viento potencialmente peligrosa con factores F superiores a 0,1 y se requiere un aviso (o alerta, en los Estados Unidos) para el factor F 0,13.³⁶ Para ilustrar factores F característicos en los fenómenos que producen cizalladura del viento, es poco probable que las corrientes en chorro a poca altura produzcan valores superiores al umbral de 0,1; no obstante, un piloto que no esté atento podría aún experimentar dificultad, mientras que si se le avisa podría normalmente enfrentar dichas situaciones añadiendo empuje. En las microrráfagas, se supera el umbral de 0,1 en alrededor de la mitad de los casos bien documentados, mientras que los centros de las microrráfagas fuertes producen valores entre 0,25 y 0,36, lo que para la mayoría de las aeronaves de reacción de transporte se considera condiciones en que es imposible efectuar un vuelo.

d. La notación $\dot{z}$ equivale a $\frac{dz}{dt}$ y, del mismo modo, $\dot{E}_T$ y $\dot{U}_x$ equivalen a $\frac{dE_T}{dt}$ y $\frac{dU_x}{dt}$, respectivamente.

5.1.50 La certificación del equipo de a bordo de aviso de cizalladura del viento exige que se verifique, entre otras cosas, si puede producir las alertas requeridas al alcanzar valores de umbral correctos, de manera fiable y dentro del nivel aceptable de falsas alarmas y modos de falla, etc. A fin de lograrlo, la FAA elaboró una serie de modelos de cizalladura del viento basándose en los datos JAWS y campos de viento derivados de los datos relativos a accidentes de aviación causados por cizalladura del viento (véase 3.5.17 a 3.5.20). El fabricante de equipo de aviso de cizalladura del viento debe demostrar que el equipo puede funcionar según sus especificaciones cuando se ensaye en un simulador con los modelos de cizalladura del viento de la FAA.

5.1.51 En las circulares de asesoramiento de la FAA mencionadas en 5.1.47, se enuncia la política siguiente:

La aplicación de esta tecnología [de tipo reactivo] requiere inherentemente la entrada del avión en cierto nivel de cizalladura del viento con una pérdida o ganancia de la pendiente ascensional posible. No obstante, estos sistemas proporcionan un valioso servicio para detectar, anunciar oportunamente y confirmar condiciones de cizalladura del viento potencialmente peligrosas, generalmente antes de que el piloto se dé cuenta de la situación. En el caso de los sistemas que proporcionan características de orientación del mando, la energía disponible del avión se controla eficazmente para mejorar el control de la trayectoria del vuelo durante la maniobra de evasión. Idealmente, la elaboración de un sensor situado en una plataforma en movimiento que permita detectar el movimiento del aire claro por delante del avión, teniendo la superficie de la tierra como fondo, tendría todas las ventajas de un sistema frontal. La FAA ha determinado un requisito para definir los requisitos relativos a los sistemas para estos dispositivos y pidió a la NASA que se encargara de sus aspectos técnicos, dado que se necesitaban amplias investigaciones y ensayos.

Sólo el equipo frontal de a bordo de aviso de cizalladura del viento podría satisfacer plenamente los requisitos operacionales aprobados por la Comisión de Aeronavegación de la OACI en 1982, que se reproducen en el Apéndice 1. En los párrafos que siguen se describe el desarrollo de equipo frontal de a bordo de aviso de cizalladura del viento, que se realizó con éxito.

Sistemas frontales de aviso de cizalladura del viento

5.1.52 En 1990, la FAA enmendó su FAR 121.358 — “Low-altitude wind shear system requirements” para abarcar sistemas frontales de detección (de predicción) de cizalladura del viento y de evasión de esta última como una alternativa reconocida a los sistemas de tipo reactivo. Como se indicó en los párrafos precedentes, los requisitos operacionales de la OACI sólo pueden satisfacerse mediante sistemas frontales. A partir de 1990, la FAA permitió el uso de tales sistemas, tan pronto como se hubiesen producido, ofrecido en el mercado y certificado.³⁷ Como resultado de esta ampliación de este FAR, cuatro líneas aéreas importantes de los Estados Unidos solicitaron a la FAA una ampliación respecto a la fecha de cumplimiento mencionada en FAR 121.358 a fin de finalizar una evaluación y certificación de sistemas de predicción. Las cuatro empresas presentaron un plan completo en que se mencionan sus objetivos para la evaluación y un calendario para llevarla a cabo. Luego la FAA aprobó sus solicitudes, otorgando una exoneración para una ampliación de dos años. A fin de facilitar el desarrollo de la tecnología necesaria, la FAA, la NASA, fabricantes de equipo para cizalladura del viento y las mencionadas líneas aéreas se reunieron en un “Grupo de trabajo sobre sistemas frontales de detección de cizalladura del viento”, que elaboró unas “modalidades de certificación” que finalmente dieron lugar a la elaboración de la metodología general de certificación y a los requisitos a nivel de sistemas que se acaban de mencionar.

5.1.53 Aunque algunos de los criterios y métodos básicos ya empleados para certificar sistemas de tipo reactivo podrían también utilizarse para los sistemas frontales, ese no era el caso para las simulaciones, dado que los sistemas de tipo reactivo experimentan la cizalladura en tiempo real, mientras que los sistemas frontales tienen que detectar la cizalladura peligrosa que se halla por delante de la aeronave y

estimar una pérdida prevista de actuación a lo largo de la trayectoria de vuelo. En particular, la serie de datos atmosféricos utilizada para la simulación debería incluir, además del campo de viento, las condiciones MET presentes durante una cizalladura del viento que podrían afectar a la capacidad de detección de los sistemas. Fueron también necesarios mediante ensayos en vuelo, modelos de entornos de fuertes ecos parásitos en tierra en aeropuertos importantes representativos que tuviesen un tráfico terrestre en movimiento significativo en las cercanías; fue, asimismo, necesario integrar estos datos con las capacidades de telemetría dinámica para la detección de cizalladuras del viento simuladas del sistema objeto de certificación. En el Apéndice 6 figuran la metodología de certificación, los requisitos de los sistemas y los relativos a alerta, aviso y presentación de la FAA para los sistemas frontales de a bordo de aviso de cizalladura del viento.

5.1.54 Se ensayaron diversas tecnologías como parte del programa de desarrollo y certificación de sistemas frontales de a bordo de aviso de cizalladura del viento de la FAA, como se indica a continuación:

- a) infrarrojo pasivo;
- b) radar Doppler;
- c) radar de ondas milimétricas;
- d) LIDAR.

La tecnología del infrarrojo pasivo se basó en la detección de la diferencia de temperatura (más fría) que tiene lugar en las microrráfagas, en comparación con la atmósfera circundante y estableciendo la relación con la velocidad vertical (intensidad) de la corriente descendente. Los sensores del radiómetro eran instrumentos de exploración multispectral que funcionan en la “ventana” atmosférica de 10–14 μm . Se han ensayado también dichos instrumentos para detectar CAT y cenizas volcánicas; en el *Manual sobre nubes de cenizas volcánicas, materiales radiactivos y sustancias químicas tóxicas* (Doc 9691) se describe esta última aplicación. La eliminación del ruido en la señal debido, entre otras cosas, a turbulencia o precipitación entre el sensor y el objetivo, es un problema difícil, aunque no necesariamente insuperable, para toda forma de tecnología de sensores de infrarrojo pasivo. Además, a menos que se combinaran los sensores con otros de infrarrojo, tales como para turbulencia y cenizas volcánicas, que podrían llegar a ser equipo obligatorio en el futuro, sería necesario instalar un sensor de infrarrojo especializado por separado para detectar cizalladura del viento. Tiende a ser objeto de considerable resistencia de los fabricantes y líneas aéreas, por diversos motivos, la instalación de equipo completamente nuevo en el puesto de pilotaje, que ya tiene demasiados instrumentos; por consiguiente, normalmente los esfuerzos deberían concentrarse en desarrollar, en la medida de lo posible, el equipo existente del puesto de pilotaje.

5.1.55 Este último aspecto corresponde a los radares meteorológicos ya disponibles e instalados en todas las aeronaves de reacción de transporte. La última generación de radares meteorológicos existente, procedentes de varios fabricantes de radares meteorológicos de a bordo, ya utilizaban técnicas de procesamiento de señales Doppler para detectar áreas de turbulencia en las tempestades y tenían antenas apropiadas y transmisores coherentes de estado sólido que funcionan en la banda X que podrían modificarse. Por consiguiente, era posible que se pudiesen utilizar dichos radares para detectar cizalladura del viento, tal vez incluida la modificación de los radares meteorológicos existentes de modelos más viejos, modificando algunos módulos y elaborando algoritmos adicionales de detección y aviso de microrráfagas.³⁸ No obstante, el desarrollo del radar Doppler de a bordo para detectar cizalladura del viento seguía presentando varias dificultades. Debía resolverse el problema perenne de las “falsas alarmas”, que es pertinente para todos los sensores. Luego, existía el problema del ruido debido a los ecos parásitos en tierra en los lóbulos principal y laterales del transmisor, que era particularmente serio para los radares que se observan bajando la vista para la aproximación y el aterrizaje, debido a edificios de la ciudad o el aeropuerto y vehículos terrestres en movimiento, etc. Después de todo, dichos radares meteorológicos ya se utilizaban intencionalmente por los pilotos en un modo de trazado bajando la vista, en que las señales de retorno de las características terrestres y la topografía eran las entradas necesarias. Por consiguiente, era

claro que se necesitaría un modo separado de detección de cizalladura del viento que permitiera eliminar los ecos parásitos en tierra de las señales de retorno. Esto significaría tres modos operacionales: meteorológico y de trazado, detección de turbulencia y detección de cizalladura del viento.

5.1.56 La NASA emprendió la investigación inicial de radares Doppler de a bordo en los años ochenta utilizando diversas aeronaves con instrumentos de investigación. Los datos obtenidos de estos ensayos en vuelo definieron el problema y señalaron diversas soluciones posibles y válidas para que los fabricantes las prosiguieran.³⁹ El programa de investigaciones de la NASA produjo también una serie básica de parámetros relativos a cizalladura del viento, incluidas las microrráfagas húmedas y secas, que podrían utilizarse para la simulación del peligro, entre otras cosas, para ensayar equipo frontal de a bordo de aviso de cizalladura del viento.⁴⁰ A medida que continuaba el desarrollo, los fabricantes de radares de a bordo interesados efectuaron sus propios ensayos en vuelo y se juntaron a las cuatro líneas aéreas que habían solicitado y obtenido una ampliación de dos años para el cumplimiento de la instalación de equipo de a bordo de aviso de cizalladura del viento. Se utilizó también el factor F, descrito en 5.1.48, como el nivel de determinación del peligro de la cizalladura del viento en los algoritmos elaborados para los sistemas frontales de a bordo de aviso de cizalladura del viento. El requisito relativo a la probabilidad de detección y las falsas alarmas fue perfeccionado. También se tomó nota de que era necesaria mucha cautela para el mantenimiento del radomo. A mediados de los años noventa, varios fabricantes de radares de a bordo habían elaborado con éxito y certificado eficaces sistemas frontales de a bordo de aviso de cizalladura del viento como modificaciones de sus “viejos” radares meteorológicos de a bordo. En vista de la importancia de estos sistemas para combatir la cizalladura del viento, en el Apéndice 6 se describe en detalle un modo frontal característico de a bordo de aviso de cizalladura del viento en un radar meteorológico de a bordo disponible en el mercado.

5.1.57 Con el éxito del desarrollo y la certificación de sistemas frontales de a bordo de aviso de cizalladura del viento, la OACI enmendó en 1998 el documento de reglamentación pertinente (Anexo 6 — *Operación de aeronaves*, Parte I — *Transporte aéreo comercial internacional* — *Aviones*) para recomendar la instalación de estos sistemas en las aeronaves con motores de turbina con una masa de despegue superior a 5 700 kg. Estas enmiendas se basaban en la Exposición de requisitos operacionales que figuran en el Apéndice 1 del presente manual. Al elaborar la propuesta de enmienda, se pidió especialmente a los Estados y a las organizaciones internacionales interesadas su opinión sobre la pertinencia o no de que el requisito de instalar equipo frontal de a bordo de aviso de cizalladura del viento se aplicara también a las aeronaves de turbohélice. A este respecto, se consideraba que normalmente dichas aeronaves no sufrían los efectos de la cizalladura del viento del mismo modo que las aeronaves con motores de turbina. Esto se debía principalmente al hecho de que la aplicación de la plena potencia por el piloto en una aeronave de turbohélice producía un aumento casi inmediato de la corriente de aire (corriente de las hélices) encima de las alas y mayor velocidad relativa y sustentación. En el caso de una aeronave con motores de turbina, después de la aplicación de la plena potencia por el piloto, debe acelerarse la totalidad de la masa de la aeronave antes de que se transforme en mayor velocidad relativa y sustentación, lo que, inevitablemente, exige unos pocos segundos vitales. Se decidió que, por el momento, la recomendación se limitara a los aviones con motores de turbina con una masa máxima de despegue certificada superior a 5 700 kg o autorizados para transportar a más de nueve pasajeros.

5.1.58 En el caso del radar de ondas milimétricas, la mayoría de los esfuerzos de investigación se han centrado en desarrollar un sistema que pudiese utilizarse para aterrizajes por instrumentos con visibilidad virtualmente cero, permitiendo al piloto que percibiese la pista con un colimador de pilotaje (HUD) aun al aterrizar en lluvia y niebla. Si los resultados son positivos, se prevé que podría añadirse al sistema un modo frontal de aviso de cizalladura del viento. Los resultados son prometedores y continúan las investigaciones, pero hasta el momento ningún sistema se ha sometido a certificación.

5.1.59 Durante los últimos dos decenios, el posible uso de LIDAR de a bordo para detectar cizalladura del viento ha sido objeto de investigaciones en varios Estados. El Royal Aircraft Establishment (RAE) en Bedford (Reino Unido) y la NASA han estado examinando el uso del LIDAR Doppler para medir la velocidad

y dirección del viento en vuelo.^{41,42,43} El LIDAR Doppler funciona exactamente según el mismo principio que el radar Doppler pero utiliza luz infrarroja coherente producida por un láser infrarrojo de CO₂ (véanse 5.1.17 a 5.1.42). En el sistema RAE, llamado sistema láser de velocidad verdadera (LATAS), el haz láser se enfocó a 500–600 m por delante de la aeronave y se midió el movimiento del aire en ese punto respecto al transmisor en movimiento. De este modo, el sistema podía informar al piloto acerca de los posibles cambios en la velocidad relativa debido a cizalladura del viento unos cuatro segundos por delante de la aeronave. El instrumento medía el movimiento de las partículas aerosol en el aire respecto a la aeronave y a lo largo de la trayectoria de vuelo (viento de frente y de cola) de modo que no podía, según su diseño actual, medir la componente vertical y las componentes del viento de costado (p. ej., ráfagas descendentes). Sin embargo, si se utilizara el sistema LATAS en modo de exploración cónica, podrían también medirse las componentes vertical y transversal del viento por delante de la aeronave. Durante el aterrizaje y el despegue, el haz de exploración puede también dirigirse hacia arriba y hacia abajo a lo largo de la trayectoria de vuelo prevista. La aeronave HS-125 en la que se instaló el sistema participó también en el proyecto JAWS (véase 3.5.16). Se informó que el sistema era robusto, fiable y ligero, que exigía mantenimiento, ajustes y calibración mínimos y podía medir la “velocidad relativa” hasta 800 m por delante de la aeronave en aire claro o en nubes. Funcionaba más eficazmente por debajo de 6 km (20 000 ft) donde abundan los aerosoles; aunque disminuye el retorno de señales por encima de dicho nivel, se hicieron mediciones del viento hasta la altitud operacional máxima del HS-125 [13 km (43 000 ft)].

5.1.60 En los Estados Unidos, el LIDAR Doppler ha sido objeto de investigación y desarrollo durante varios años, para medir velocidades del viento^{44,45} y detectar CAT. Si bien estos sistemas pueden medir velocidades del viento por delante de la aeronave, hasta el momento ninguno de ellos ha sido presentado para certificación como sistema frontal de aviso de cizalladura del viento. Respecto a CAT, sin embargo,

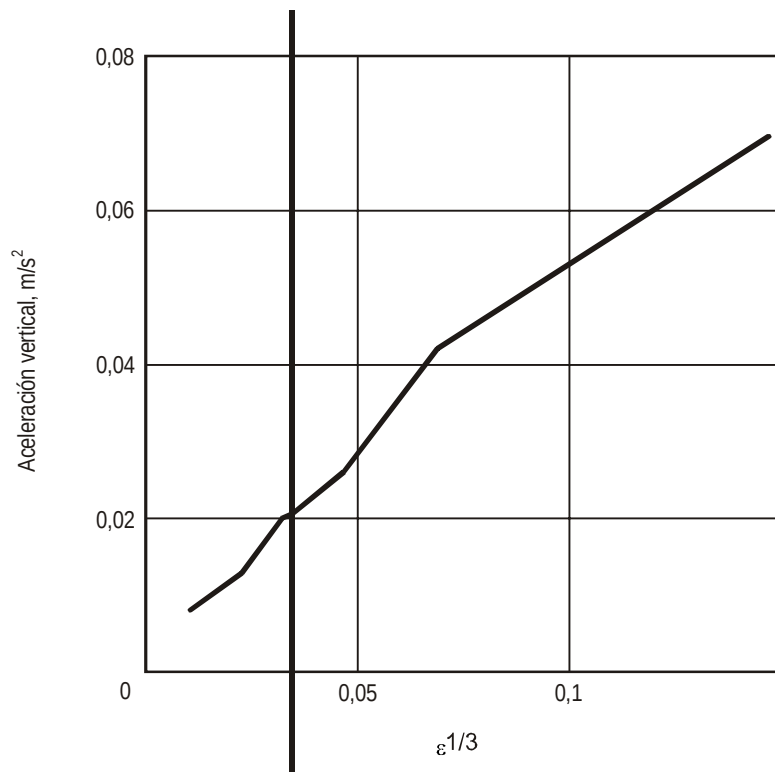


Figura 5-6. Variación en la aceleración vertical y la raíz cúbica del índice de disipación de los remolinos
(según Soreide, Bogue, Ehernberger, Hannon y Bowdle, 2000)

esto puede dar lugar a la certificación de un sistema LIDAR que tal vez podría servir un doble objetivo para detección y aviso de cizalladura del viento y CAT. Este último fenómeno MET ha adquirido en el último decenio una importancia creciente debido al número de accidentes de aviación que han causado numerosos heridos y muertos entre pasajeros y tripulación como resultado de CAT fuerte a nivel de crucero. Uno de los más recientes trabajos en esta esfera⁴⁶ indica excelentes posibilidades y sería interesante observar si los sistemas frontales de a bordo de detección y aviso de CAT se convierten en el futuro en equipo “requerido” en las aeronaves de reacción de transporte. La investigación indica que aun una CAT moderada podría detectarse a distancias de 5–8 km y hasta 100 s por delante de la aeronave. Dicho aviso anticipado permitiría un cambio de altitud o una verificación para asegurarse de que todos los pasajeros y la tripulación estén sentados en condiciones de seguridad. Las investigaciones recientes sobre turbulencia que la aeronave debe notificar en vuelo indican el parámetro llamado “índice de disipación de los remolinos (EDR)”, que es una medida viable de la turbulencia y un medio razonable de predicción de un aumento de variación en la aceleración vertical. En la Figura 5-6 se indica un ejemplo de la comparación entre la aceleración vertical y el EDR durante ensayos en vuelo. El EDR es de interés particular porque en los requisitos de la OACI ya forma la base de la notificación automatizada de turbulencia desde la aeronave. Dado que el EDR puede integrarse como variable en los modelos de predicción meteorológica atmosférica numérica, su futuro uso en sistemas de a bordo de detección y aviso permitiría lograr resultados completos, ya que la observación, aviso y notificación automatizada de la turbulencia y la pronosticación de turbulencia del Sistema mundial de pronósticos de área (WAFS) en pronósticos de tiempo significativo (SIGWX) para la documentación de vuelo se basarían en el mismo parámetro.

5.1.61 Los HUD han sido equipo regular en las aeronaves de combate por muchos años y se han instalado también en aeronaves comerciales de ciertas líneas, pero no específicamente para avisos de cizalladura del viento. El HUD es un sistema para presentar al piloto orientación esencial e información de control reflejada en un vidrio parcialmente transformado en espejo, pero por lo demás transparente, instalado a determinado ángulo entre los ojos del piloto y el parabrisas del puesto de pilotaje. El piloto puede tener la vista habitual del exterior a través de dicho vidrio y del parabrisas; al mismo tiempo, se proyectan en dicho vidrio orientación simbólica e información de control, y un porcentaje se refleja hacia el piloto y así se superimpone directamente sobre la visión que el piloto tiene del exterior. La información de control se halla siempre directamente a la vista sin que el piloto tenga que mirar hacia abajo, ajuste el foco o examine diversos instrumentos de vuelo. Además de la información en símbolos habitual proporcionada en los HUD tradicionales, se han efectuado ensayos en varios Estados para proporcionar indicadores de trayectoria de vuelo (FPI) específicos, por ejemplo un símbolo FPI que represente el punto de toma de contacto en la pista previsto en relación con la trayectoria de vuelo real y un símbolo de “trayectoria de vuelo posible (PFP)” que indica aceleración o deceleración de la aeronave (suponiendo que el FPI se mantiene en el punto de visada, por ejemplo ajustando el timón de altura). Cuando se superponen ambos símbolos, la aeronave no está acelerando ni decelerando y se indica cizalladura del viento cuando los símbolos se separan en la presentación.⁴⁷ La mayoría de los pilotos que tomaron parte en los ensayos HUD indicaron que los ensayos los ayudaron considerablemente para enfrentar condiciones de cizalladura del viento simuladas.

MODELOS DE CIZALLADURA DEL VIENTO Y TURBULENCIA

5.1.62 En esta sección se examinan los modelos de cizalladura del viento y turbulencia y su uso para certificar sistemas de a bordo de aviso de cizalladura del viento y simuladores de instrucción de vuelo. El desarrollo de modelos de viento progresó rápidamente en los Estados Unidos, principalmente como parte integrante del programa sobre cizalladura del viento y turbulencia de la FAA, de mediados hasta finales de los años ochenta. Los modelos fueron diseñados para diversas aplicaciones y se contaba con varias opciones cuyo valor relativo debía atribuirse antes de seleccionarlos para uso operacional. Se han desarrollado modelos con numerosos niveles de complejidad, siendo los más complejos los utilizados para fines de investigación (tridimensionales o cuatridimensionales), mientras que los que se utilizan en los

simuladores de vuelo para la instrucción diaria de pilotos, por motivos obvios, son probablemente los menos complejos (sobre todo bidimensionales). Los datos sobre el viento utilizados como base para los primeros modelos de cizalladura del viento para fines de investigación se obtuvieron de dos fuentes principales: el proyecto JAWS y las subsiguientes series de datos sobre el viento de proyectos conexos y reconstitución de los vientos en accidentes de aviación donde se indicaba la cizalladura del viento como factor⁴⁸ (véanse 3.5.16 y siguientes). Además, se necesitaban con urgencia modelos de cizalladura del viento y turbulencia para desarrollar sistemas terrestres y de a bordo de detección y aviso, para la certificación de sistemas de a bordo de detección y aviso utilizando la simulación y para los simuladores de vuelo utilizados para la instrucción de pilotos.

5.1.63 Inicialmente, los modelos, llamados modelos de la fase I, seleccionados por la FAA para certificar sistemas de a bordo para cizalladura del viento “de tipo reactivo” y para uso en simuladores de instrucción se basaban en información proporcionada por los registradores de los datos de vuelo de accidentes de aviación reales relacionados con cizalladura del viento. En este método se centraron los modelos en cizalladura del viento “peligrosa” conocida y proporcionaron suficientes parámetros de aeronave registrados durante dichos encuentros, tales como velocidad relativa, rumbo, altitud y aceleración de la aeronave, para permitir el desarrollo de campos o perfiles del viento modelos que presentaban cizalladura del viento peligrosa.

Nota.— En esa época la mayoría de las aeronaves tenían registradores de datos de vuelo de cuatro canales, aunque los registradores más recientes deben registrar un mayor volumen de datos.

Los modelos de la fase I eran relativamente simples, utilizando datos procedentes de dos accidentes causados por cizalladura del viento (Eastern Airlines B727 en Nueva York e Iberia DC-10 en Boston). Dichos modelos no resultaron satisfactorios para su uso en simuladores de instrucción de vuelo. Por consiguiente, la FAA otorgó un contrato a SRI International para reunir a un equipo de expertos de las disciplinas pertinentes, tales como meteorología, dinámica de fluidos y tecnología de simuladores, para revisar los modelos sin perder el vínculo importante con los accidentes reales causados por cizalladura del viento en los que se basaban. Este esfuerzo combinado produjo un campo de viento más representativo de la cizalladura del viento peligrosa, que se incluyó como ejemplo en la Circular de asesoramiento 120-41 — *Criteria for Operational Approval of Airborne Wind Shear Alerting and Flight Guidance Systems*, de 1983, de la FAA.

5.1.64 Después de haberse expedido los datos de campos de viento modelo iniciales de SRI, se han revisado y mejorado continuamente los modelos de cizalladura del viento utilizados por la FAA para la certificación de sistemas de a bordo, la validación de sistemas terrestres y la instrucción de pilotos, etc. Se cuenta actualmente con una serie relativamente estable de modelos cuya complejidad relativa es apropiada para el uso previsto. A este respecto, se utiliza para la certificación de sistemas de a bordo de aviso de cizalladura del viento una serie de datos detallada de los campos de viento conocida como TASS (sistema de simulación del área terminal) de la NASA. En la Tabla A7-1 del Apéndice 7 se indican el uso y el contenido de esta serie de datos para fines de simulación y para las situaciones de certificación aplicadas. En dicha tabla se indica que los modelos abarcan una mezcla de datos de accidentes reconstituidos, datos de sondeos de aeródromo y sondeos derivados que ilustran situaciones de cizalladura del viento y datos de vuelo particulares.

5.1.65 Por motivos de orden logístico y económico, los modelos de campos de viento en los simuladores de vuelo utilizados para la instrucción de pilotos no pueden y, normalmente, no deben ser tan perfeccionados y complejos, ni tan amplios como la serie de datos de campo de viento TASS utilizada para la certificación de sistemas de a bordo. Los campos de viento del simulador de instrucción de piloto recomendados por la FAA son principalmente perfiles bidimensionales, pero cada punto de datos contiene componentes u , v y w a lo largo de la pendiente de planeo de 3° y las trayectorias de ascenso inicial derivadas de los datos de accidentes, aunque algunos explotadores utilizan modelos tridimensionales de una microrráfaga. La instrucción de pilotos es una parte importante de la ayuda para la instrucción sobre

cizalladura del viento de la FAA, que contiene un volumen de datos pertinentes, entre otras cosas, incluida una serie de perfiles de viento de cizalladura del viento recomendados. (Véase el Capítulo 6 respecto a la instrucción de pilotos.)

5.2 PRONÓSTICOS DE CIZALLADURA DEL VIENTO

GENERALIDADES

5.2.1 En los aeródromos afectados por cizalladura del viento, pero que carecen de equipo operacional para observarla o detectarla y medirla (véase 5.1), es muy difícil pronosticar la cizalladura del viento. Por lo general, el único método viable consiste en tratar de pronosticar la aparición de fenómenos MET que se sabe que producen cizalladura del viento, en la inteligencia de que en realidad puede o no producirse una cizalladura del viento significativa y que incluso si se produce no puede predecirse su intensidad. Esta dificultad significa también que se carece de estadísticas climatológicas detalladas sobre frecuencia, distribución e intensidad de la cizalladura del viento a poca altura en las cercanías de los aeródromos.

5.2.2 Los esfuerzos de investigación concentrados se desplegaron durante estos últimos años y los progresos más notables se han realizado en dos frentes. El primero es la utilización creciente del radar Doppler para investigaciones en la esfera de la estructura y dinámica de las tormentas y de las cizalladuras del viento que ocasionan y el segundo es la acumulación regular de datos para una base de datos a escala mundial sobre cizalladura del viento encontrada durante el aterrizaje y el despegue, obtenidos de los sistemas de a bordo de registro de datos (AIDS) con que están equipados los grandes aviones de reacción de transporte (véase 3.7). Estos esfuerzos permiten comprender mejor la cizalladura del viento y, especialmente, concentrar la atención en los tipos específicos de cizalladura del viento que parecen ser los más peligrosos para las aeronaves.

5.2.3 Mientras tanto, la mayoría de los aeródromos deben recurrir a diversas “reglas empíricas” de predicción que han sido elaboradas basándose en la teoría de los fenómenos MET y en los amplios conocimientos del área en cuestión. Un ejemplo de ello es la serie de reglas empleadas por la oficina MET del Reino Unido durante los ensayos de predicción de cizalladura del viento efectuados en 1977. Las actuales reglas resultantes de dichos ensayos, utilizadas operacionalmente desde 1985, figuran en el Apéndice 8. Un conjunto semejante de reglas, modificadas en la medida necesaria para hacer frente a situaciones diferentes, se emplean actualmente por el Servicio Meteorológico Nacional de los Estados Unidos.⁴⁹

5.2.4 Un pronóstico meteorológico para determinada área tiene normalmente información sobre los fenómenos previstos que se clasifican bajo tres títulos principales: “tipo”, “hora” e “intensidad”, es decir, cuáles son los fenómenos que se prevén, a qué hora deben producirse y cuál será su duración, así como su intensidad. La cuestión de la intensidad es de importancia crítica para pronósticos de cizalladura del viento. Un simple pronóstico o informe de cizalladura del viento en la trayectoria de aproximación en un momento dado alerta a los pilotos que realizan la aproximación y, desde este punto de vista únicamente, les proporciona información útil. En realidad lo que el piloto necesita conocer es la intensidad de la cizalladura del viento para evaluar su probable efecto en la aeronave. Habida cuenta de la importancia que tiene la intensidad de la cizalladura del viento, deberían examinarse los numerosos problemas que plantea la clasificación de la cizalladura del viento desde el punto de vista de su intensidad.

INTENSIDAD DE LA CIZALLADURA DEL VIENTO

5.2.5 En el Capítulo 2 se analizan varios métodos de cálculo de la cizalladura del viento, así como las distintas unidades actualmente utilizadas. Tradicionalmente, la cizalladura del viento, considerada como la

diferencia vectorial entre dos vientos en distintos puntos en el espacio, ha sido habitualmente calculada en unidades de velocidad por una distancia dada, por ejemplo, en kt por 100 ft o m/s por 30 m. A primera vista, parece que la clasificación de la intensidad de la cizalladura del viento en determinado número de clases, definidas por valores obtenidos empíricamente en kt/100 ft o m/s por 30 m, no ofrecería ningún problema. Este fue el método que se siguió en la quinta Conferencia de navegación aérea (Montreal, 1967), durante la cual se recomendaron los criterios provisionales sobre intensidad de la cizalladura del viento que figuran en la Tabla 5-4. En esta tabla inicial, las intensidades de cizalladura del viento se dividieron en cuatro clases que variaban entre ligera y muy fuerte, expresándose sus valores en kt por 30 m; se agregaron ulteriormente criterios cualitativos determinados con arreglo al efecto probable de cada clase de cizalladura en los mandos del avión.

5.2.6 En esa época, se estimaba que el peligro principal de la cizalladura del viento se relacionaba con los frentes, incluidos los frentes de ráfagas procedentes de tormentas y los perfiles de vientos extremos en la proximidad del suelo que podían visualizarse fácilmente en forma de gradientes de la velocidad del viento. Sin embargo, ha resultado luego evidente que este método relativamente simple de clasificación de la intensidad de la cizalladura del viento no es del todo satisfactorio por los motivos siguientes:

- a) la misma intensidad de cizalladura del viento, con arreglo a la clasificación de la Tabla 5-4, puede afectar de manera distinta a cada tipo de aeronave; lo que podría considerarse como cizalladura muy fuerte para un tipo de aeronave sólo se considera como cizalladura moderada para otro tipo. Esto es especialmente cierto en el caso de aeronaves pertenecientes a categorías de masa muy diferentes;
- b) el efecto que la cizalladura del viento tiene en una aeronave depende, entre otras cosas, de la velocidad a la cual ésta pasa a través del fenómeno y la distancia que cubre la cizalladura del viento, por consiguiente, del tiempo en que la aeronave está expuesta a esta última;
- c) la información sobre la intensidad de la cizalladura del viento expresada en unidades de velocidad y distancia no puede ser directamente utilizada por el piloto que vuela en una pendiente de planeo de 3°, puesto que no está acostumbrado a estas unidades que no corresponden a las indicadas por los instrumentos que suelen encontrarse en los puestos de pilotaje. Los pilotos están acostumbrados a utilizar unidades de velocidad relativa y, por consiguiente, los cambios de esta última son aceleraciones o deceleraciones expresadas en kt/s o en unidades g;
- d) la cizalladura del viento más peligrosa es la que acompaña las tormentas, o sea, microdescendentes en las que las tres componentes del viento varían todas al mismo tiempo; y
- e) los valores límites de las clases de intensidad de la cizalladura en las componentes horizontales del viento que figuran en la Tabla 5-4 (*excluidas* las corrientes descendentes) no parecen haber sido corroborados por los análisis de datos AIDS efectuados por el RAE, basándose en más de 9 000 aterrizajes realizados en todo el mundo por aeronaves B747 de British Airways. En este estudio, las aeronaves encontraron cizalladuras del viento clasificadas como muy fuertes con arreglo a los criterios de la Tabla 5-4, pero que habían, evidentemente, ofrecido escasa o ninguna dificultad para el piloto al efectuar el aterrizaje.⁵⁰

5.2.7 El hecho de que haya un número de problemas no resueltos, relacionados con los criterios provisionales aplicables a la intensidad de la cizalladura del viento ha tenido dos efectos principales. Primero, no es posible ahora utilizar los calificativos “ligera”, “moderada”, “fuerte” y “muy fuerte” en relación con la cizalladura del viento en las disposiciones referentes a la cizalladura del viento que figuran en el

Tabla 5-4. Criterios provisionales sobre intensidad de la cizalladura del viento recomendados por la quinta Conferencia de navegación aérea (Montreal, 1967)

Ligera	—	de 0 a 4 kt, inclusive, por 30 m (100 ft)
Moderada	—	de 5 a 8 kt, inclusive, por 30 m (100 ft)
Fuerte	—	de 9 a 12 kt, inclusive, por 30 m (100 ft)
Muy fuerte	—	más de 12 kt por 30 m (100 ft)

Anexo 3 — *Servicio meteorológico para la navegación aérea internacional* (Capítulos 4, 5 y 7). Por consiguiente, en las disposiciones del Anexo 3 se exigen informes de observación, pronósticos y avisos de cizalladura del viento sin especificación de la intensidad. No obstante, se reconoce en el Anexo 3, Apéndice 6, 6.2.4, Nota 2, que “los pilotos, al notificar la cizalladura del viento, la caractericen utilizando expresiones tales como ‘moderada’, ‘fuerte’ o ‘muy fuerte’, que se basan, en gran medida, en una apreciación subjetiva de la intensidad de la cizalladura del viento con que se han enfrentado.” Segundo, a pesar de que se formularon varias propuestas para mejorar los criterios provisionales, la tendencia parece consistir en eludir la cuestión basando los futuros sistemas de aviso (de a bordo o terrestres) en el cálculo de la reacción aerodinámica prevista de cada tipo de aeronave a modelos normalizados de cizalladura del viento en simulador (véanse 5.2.8 a.14 para más detalles).

5.2.8 Una propuesta destinada a mejorar los criterios sobre intensidad de la cizalladura del viento fue presentada por Woodfield y Woods en su análisis de los datos sobre cizalladura del viento basados en más de 9 000 aterrizajes efectuados por aeronaves B747 de BA⁵⁰. Su propuesta se basa en el hecho de que, en la práctica, son dos los factores principales de cizalladura del viento que afectarán a las aeronaves. El primero es el ritmo de variación de la velocidad del viento en la cizalladura en comparación con la aceleración que puede alcanzar la aeronave recurriendo al margen de empuje sobrante disponible [normalmente 6 km/h por s (3 kt/s) en el caso de las grandes aeronaves de reacción de transporte en la configuración de aproximación]. El segundo factor es la magnitud total de la variación de la velocidad del viento comparada con el margen de velocidad por encima de la velocidad de pérdida [característicamente 20% de V_{Ref} o unos 50 a 60 km/h (25 a 30 kt) para las grandes aeronaves de reacción de transporte]. En general, la cizalladura del viento sólo constituirá un problema si el ritmo de variación de la velocidad del viento y la magnitud de la cizalladura son importantes. Se puede ilustrar esta situación examinando dos casos extremos: en el primero, una aeronave puede hacer frente incluso a una variación de la velocidad del viento de 200 km/h (100 kt) si el ritmo de variación es sólo de 0,2 km/h por s (0,1 kt/s); análogamente, en el otro caso, si la variación de la velocidad del viento es solamente de 10 km/h (5 kt), el ritmo de variación puede llegar hasta 20 km/h por s (10 kt/s) sin que ello suponga problema alguno.

5.2.9 Además, el examen de la reacción de las aeronaves parece indicar que cuando el ritmo de variación de la velocidad del viento es superior a la aceleración disponible a pleno empuje, entonces la magnitud de la variación de la velocidad del viento prevalece sobre la capacidad de maniobra de la aeronave. En cambio, cuando sea reducido el ritmo de variación de la velocidad del viento, la magnitud de las variaciones no tendrá ninguna importancia. Basándose en ello, los investigadores indican que el ritmo de variación del viento de frente y la relación entre la variación total del viento de frente y la velocidad de aproximación normal de la aeronave podrían considerarse como los factores principales para determinar los criterios de intensidad. Los investigadores proponen que el factor “ I ” de intensidad de la cizalladura del viento se determine con arreglo a la fórmula siguiente:

$$I = \frac{dV}{dt} \cdot \left(\frac{\Delta V}{V_{app}} \right)^2 = \frac{1}{V_{app}} \left| \frac{\Delta V}{R^{1/3}} \right|^3$$

donde

$\frac{dV}{dt}$ = ritmo de variación de la velocidad del viento,

ΔV = variación total de la velocidad del viento,

R = longitud de la rampa [distancia (en m) sobre la cual se produce la variación de la velocidad del viento o tiempo de exposición (en s), si se conoce la velocidad relativa],

V_{app} = velocidad de aproximación normal.

El parámetro principal es $\frac{\Delta V}{R^{1/3}}$ o la cizalladura del viento “normalizada”. La forma propuesta de los límites de intensidad se ilustran en la Figura 5-7.⁵⁰ Los investigadores recomiendan que estos criterios de intensidad sean objeto de pruebas en simuladores de vuelo apropiados.

5.2.10 Swolinsky⁵¹ propone una solución diferente para el problema de la intensidad de cizalladura del viento, señalando que en el factor de intensidad propuesto por Woodfield y Woods⁵⁰ no se tienen en cuenta los cambios en la componente vertical del viento (véase 5.2.9). La propuesta de Swolinsky se basa en consideraciones de energía (potencial y cinética) para la aproximación y el aterrizaje y se denomina “error de altura por energía” (ΔH_E), como sigue:

$$\Delta H_E = \frac{(V^2 - V_{Ref}^2)}{2g} + H - H_{Ref}$$

donde V , V_{Ref} son la velocidad a la altura H y la velocidad de referencia para la aproximación a la altura de referencia H_{Ref} , respectivamente.

5.2.11 En 5.1.48 y en el Apéndice 5 se describe la derivación del factor F y su creciente utilidad para definir el peligro de la cizalladura del viento para los sistemas de a bordo de aviso de cizalladura del viento y los simuladores de vuelo.

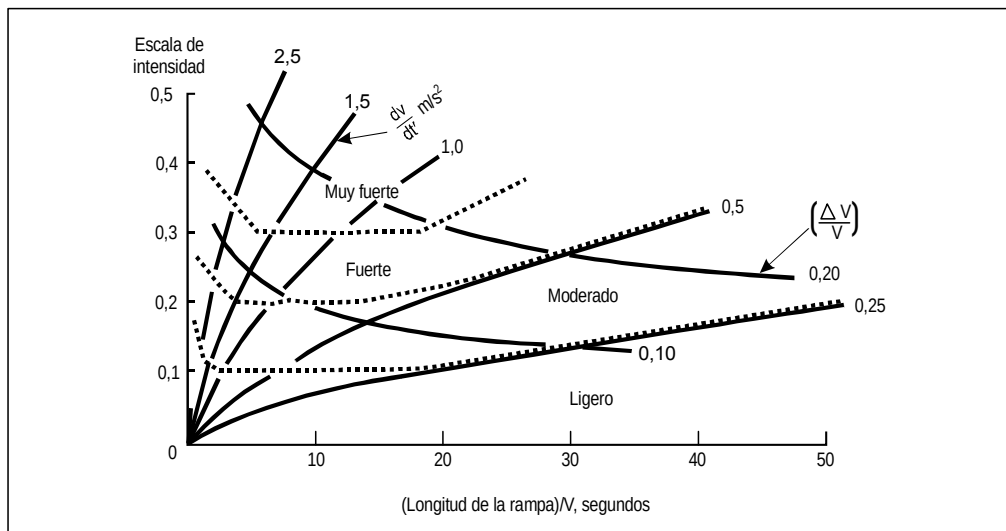


Figura 5-7. Forma propuesta de los límites de intensidad
(según Woodfield y Woods, 1984)

5.2.12 Una manera de evitar el problema de la clasificación general de la intensidad de la cizalladura del viento consiste en elaborar procedimientos de aprobación de los sistemas de a bordo de detección de cizalladura del viento basadas en la reacción del tipo de aeronave a un conjunto de modelos de cizalladura del viento “muy fuerte” simulados. Los Estados Unidos proceden de este modo y han publicado la Circular de asesoramiento (AC) 120-41, en julio de 1983, titulada *Criteria for Operational Approval of Airborne Wind Shear Alerting and Flight Guidance Systems*.⁵² Esta circular contenía una serie de modelos bidimensionales de cizalladura del viento (es decir, solamente los valores del viento en el plano de la trayectoria de aproximación, si bien se especifican las tres componentes del viento) deducidos de datos obtenidos en la reconstrucción de accidentes, de datos MET y de otras fuentes mediante los cuales puede ensayarse en el simulador un sistema de detección de a bordo. Para este procedimiento, la cizalladura del viento muy fuerte se definió como sigue:

“*Muy fuerte.*— Cizalladura del viento de tal intensidad y duración que, si se produjera, superaría la capacidad de actuación de determinado tipo de aeronave y ocasionaría pérdida imprevista de control o contacto con el suelo si el piloto no dispusiera de información procedente de un sistema de alerta y de guía instalado a bordo en caso de cizalladura del viento que corresponda a los criterios enunciados en el párrafo 4 b).”

En el párrafo 4 b) de la circular de asesoramiento se indica lo siguiente:

“*Sistema de a bordo de alerta de cizalladura del viento y de guía de vuelo.* Dispositivo o sistema que detecta la presencia de fenómenos de cizalladura del viento muy fuerte y proporciona al piloto, oportunamente, alerta y guía de vuelo en las condiciones siguientes:

- 1) *aproximación o aproximación frustrada* para permitir que el piloto utilice la capacidad máxima de actuación de que dispone la aeronave sin pérdida inesperada de control, sin pérdida y sin contacto con el suelo;
- 2) *despegue y ascenso* para permitir que el piloto utilice, en los tramos de ascenso inicial o en los tramos de ascenso después del despegue, la capacidad máxima de actuación de que dispone la aeronave sin pérdida inesperada de control y sin contacto con el suelo, quedando aún un excedente de energía.”

En el texto anterior se suponía que existía otra clase de intensidad de cizalladura del viento, además de la cizalladura “muy fuerte” de tal intensidad que no puede atravesarse con seguridad incluso utilizando sistemas de a bordo de detección. En esa época, la circular de asesoramiento se aplicaba a los sistemas de aviso de cizalladura del viento de tipo “reactivo”.

5.2.13 Aunque no constituye estrictamente una medición de la intensidad de la cizalladura del viento *per se*, como se analizó en 5.1.48, el factor F resultó un índice de intensidad de la cizalladura del viento muy útil en el estado de energía cambiante de una aeronave debido a cizalladura del viento. Este índice depende de las situaciones y se utiliza principalmente para certificar sistemas de a bordo de aviso de cizalladura del viento y, por ende, en los algoritmos del sistema que determinan la situación de alerta y en los simuladores de vuelo. Sin embargo, puesto que el factor F depende en una medida relativamente limitada de la velocidad relativa en estas situaciones, se seleccionan velocidades relativas nominales para el aterrizaje y el despegue, por ejemplo de 240, 300 y 400 km/h (120, 150 y 200 kt), lo que abarca en general las velocidades relativas características para el aterrizaje y el despegue de la mayoría de las aeronaves de reacción de transporte. De manera general, parece que la aplicación del factor F sea probablemente la más apropiada para el equipo automatizado, tales como los sistemas de a bordo de aviso de cizalladura del viento y los simuladores de vuelo. De otro modo, en los avisos (especialmente los que se deriven manualmente), la “intensidad” de la cizalladura del viento seguirá expresándose en una pérdida o ganancia de velocidad relativa (kt) sobre una distancia de escala apropiada, como 1 km, y, en el caso de componentes verticales fuertes, sencillamente como “microrráfagas”.

5.2.14 Cuando se llegó a desarrollar sistemas frontales de a bordo de aviso de cizalladura del viento, la FAA publicó en 1990 una Technical Standing Order (TSO) C117 — *Airborne Wind Shear Warning and Escape Guidance Systems for Transport Airplanes*.⁵³ En la TSO se modificó ligeramente la definición de cizalladura del viento “muy fuerte” para fines de certificación, del modo siguiente:

“*Cizalladura del viento muy fuerte.* Cizalladura del viento de tal intensidad y duración que superaría la capacidad de actuación de determinado tipo de aeronave y podría causar pérdida imprevista de control o contacto con el suelo si el piloto no dispusiera de información procedente de un sistema de a bordo de aviso de cizalladura del viento y orientación para la evasión que satisfaga los criterios de la presente TSO.”

Como se indicó en 5.1.53, muchos de los criterios de certificación ya se utilizan con éxito para sistemas de tipo reactivo que podrían utilizarse para sistemas frontales. Sin embargo, ya en 1990 Bowles había propuesto el factor F y, a partir de ese momento, este factor definió la intensidad de la cizalladura del viento detectada por los sistemas de tipo reactivo o frontales, según lo descrito en 5.1.48 y 5.1.49, respectivamente.

CIZALLADURA DEL VIENTO TRANSITORIA Y NO TRANSITORIA

5.2.15 Desde el punto de vista de los pronósticos, la cizalladura del viento a poca altura puede fácilmente clasificarse en dos tipos, transitoria o no transitoria. Hasta cierto punto, esta distinción es artificial y de ningún modo absoluta, ya que la mayoría de las cizalladuras del viento pueden reconocerse como pertenecientes más a un tipo que a otro (véase la Tabla 5-5). La cizalladura del viento del tipo no transitoria que puede relacionarse, por ejemplo, con apreciables inversiones de la temperatura a poca altura, ondas orográficas o corrientes de aire en torno a obstáculos, tiende a afectar a determinada área y persistir durante períodos relativamente largos (medidos en horas). Actualmente este tipo de fenómeno se está pronosticando a los fines de las operaciones por varios Estados, con resultados relativamente satisfactorios. Por otro lado, la cizalladura del viento de tipo transitorio que puede acompañar a las nubes de convección y especialmente a las tormentas, suele ser de corta duración (medida en minutos), de reducida escala, rápido movimiento y muy intensa, por lo que es sumamente difícil pronosticarla. Desafortunadamente, por diversos motivos, el tipo transitorio de cizalladura del viento a poca altura, especialmente cuando este fenómeno se relaciona con tormentas, es con mucho el más peligroso para la aviación.

PRONÓSTICOS DE CIZALLADURA DEL VIENTO NO TRANSITORIA

Pronósticos de cizalladura del viento relacionada con frentes de masas de aire

5.2.16 El método de predicción de la evolución y movimiento de las superficies frontales se basa en técnicas reconocidas que se han utilizado durante muchos años con resultados satisfactorios. El hecho de que una cizalladura del viento a poca altura ocurra al paso de una superficie frontal (es decir, sin tener en cuenta la cizalladura del viento relacionada con tormentas frontales) no hace más que agregar un fenómeno a la ya amplia lista de fenómenos importantes para la aviación que es probable que se produzcan en relación con los frentes. En el análisis de los frentes, un aspecto que quizá haya recibido atención especial debido a la necesidad de pronosticar la cizalladura del viento a poca altura, es la pendiente de las superficies frontales. Los párrafos 3.3.1 a 3.3.3 y 3.4.1 a 3.4.2 del Capítulo 3 contienen una descripción detallada de la naturaleza de la cizalladura del viento relacionada con superficies frontales. Según dicha descripción, resulta evidente que, respecto a la cizalladura del viento, los aspectos más importantes de las superficies frontales son la intensidad del frente, su velocidad de movimiento y la pendiente de la superficie.

Tabla 5-5. Clasificación de cizalladuras del viento para fines de pronóstico

<i>Tipo de cizalladura del viento</i>	
<i>Transitorio</i>	<i>No transitorio</i>
De origen convectivo (incluidos frentes de ráfagas, ráfagas descendentes, microdescendentes y tornados)	Superficies frontales de masas de aire (principalmente)
Ondas gravitatorias (principalmente)	Superficies frontales de brisa de mar (principalmente)
	Ondas orográficas
	Obstáculos a la corriente del viento dominante
	Corrientes en chorro a poca altura

5.2.17 Los métodos de identificación de la ubicación, evolución y movimientos de las masas de aire son muy bien conocidos para que sea necesario repetirlos. En el pasado, estos métodos se basaron en el análisis sinóptico detallado de las observaciones de superficie y en altura. En los últimos 20 años, el análisis sinóptico se ha incrementado considerablemente mediante la utilización de información proporcionada por los satélites meteorológicos en órbita polar y, especialmente en los últimos cinco años, por los satélites meteorológicos geoestacionarios. Los principales proporcionan información pertinente a un determinado lugar, cada seis horas mientras que los segundos realizan observaciones casi continuas. Los satélites geoestacionarios (GOES), además de proporcionar imágenes de las nubes cada 30 minutos, facilitan también en tiempo real imágenes multiespectrales de la distribución de la temperatura y del vapor de agua en la atmósfera y, aproximadamente cada hora, perfiles verticales de la temperatura y de la humedad. El acceso a este manantial de datos permite efectuar análisis muy precisos de los frentes de gran amplitud. A estos métodos se agrega a la escala local la utilización de radares para la vigilancia de la evolución, intensidad y movimiento de las áreas de precipitación (de origen convectivo y no convectivo) que acompañan a los frentes.

5.2.18 Una vez que el frente ha sido localizado y que, mediante la información de sus posiciones sucesivas, han sido calculadas su velocidad y la dirección de su movimiento en relación con el aeródromo de que se trate, la etapa siguiente consiste en determinar la pendiente del frente en la región que ofrece interés especial para la aviación, es decir, a menos de 500 m (1 600 ft) AGL. El método más sencillo para ello consiste en determinar la ubicación del frente en el mapa de superficie en un momento determinado y, basándose en los datos de radiosonda viento o satélite, determinar al mismo tiempo la altura por encima del suelo de la superficie frontal por delante de un frente caliente de superficie o por detrás de un frente frío de superficie. Tal vez sea necesario efectuar un análisis más detallado utilizando cortes verticales (especialmente isentrópicos^e) de la superficie frontal. En el pasado, estos análisis exigían demasiado trabajo, pero recientemente es posible efectuarlos sirviéndose de computadoras de manera relativamente fácil. Dadas la velocidad de movimiento y la pendiente, se puede tener una idea del tiempo que transcurrirá para que la cizalladura a lo largo de la superficie frontal atraviese y sobrepase las cercanías de un aeródromo, especialmente los corredores de aproximación y ascenso. En la Figura 5-8⁴⁹ se presenta un ejemplo de nomogramas simples, pero eficaces que pueden ser de ayuda a este respecto. Sólo se ilustran dos velocidades características y una selección de pendientes típicas para cada frente, si bien es muy sencillo obtener información respecto a otras velocidades y pendientes por comparación e interpolación, respectivamente.

5.2.19 Se plantea la cuestión de si todos los frentes deben considerarse con el mismo grado de minuciosidad o si existen criterios para determinar los frentes que podrían contener cizalladura del viento a poca altura (es decir, de origen no convectivo) que pueden ser de importancia para la aviación. La cizalladura a lo largo de la superficie frontal es proporcional a la intensidad del frente que, a su vez, es

e. Este análisis de cortes verticales fue tratado detalladamente por Saucier en *Principles of Meteorological Analysis*, 1955.

proporcional al gradiente de temperatura a lo largo del frente. Se propuso y utilizó con éxito a este respecto un gradiente de temperatura crítico de 5°C por 90 km (50 NM).⁴⁹ La experiencia adquirida en el análisis de centenares de frentes en determinado aeródromo permitiría perfeccionar estos criterios. La diferencia vectorial entre los vientos a lo largo del frente y la velocidad de un movimiento de este último pueden también indicar la presencia de una importante cizalladura del viento en la superficie frontal. A este respecto, se propuso fijar en 40 km/h por 90 km (20 kt por 50 NM) la magnitud de la diferencia vectorial del viento; normalmente se proporcionan al pronosticador simples monogramas para ayudarle a calcular directamente la magnitud de la diferencia vectorial entre dos vientos aplicando la relación examinada en la Figura 2-2 c), o sea, $a = \sqrt{b^2 + c^2 - 2bc \cos A}$. Análogamente, en los frentes que se mueven a velocidades de 30 kt o más, suele estar presente cizalladura del viento significativa. Deben tenerse en cuenta dos aspectos respecto a los criterios basados en la velocidad del movimiento frontal. Mientras los frentes que avanzan a velocidades de 30 kt o más (suele tratarse de frentes fríos de pendiente escarpada) tienden a generar cizalladuras del viento frontal apreciables, el hecho de que los frentes avancen tan rápidamente significa que cualquier efecto de cizalladura del viento por debajo de 500 m (1 600 ft) es probable que sólo afecte al aeródromo durante un corto período. Esto significa, quizás algo paradójicamente, que los frentes que avanzan más lentamente, incluidos los frentes calientes, aun cuando presenten condiciones de cizalladura del viento frontal (de origen no convectivo) menos notables, al moverse muy lentamente o incluso al permanecer casi estacionarios, pueden tener, en términos generales, un efecto más apreciable en las operaciones de las aeronaves (p. ej., numerosas aproximaciones frustradas) que los frentes fríos intensos que avanzan rápidamente.

5.2.20 Puede efectuarse una estimación cuantitativa de la cizalladura del viento a lo largo de la superficie frontal analizando los campos de viento y sus perfiles en las cercanías del frente. En el caso poco probable de que una estación radiovientosonda/globo piloto esté situada en un emplazamiento apropiado en relación con la superficie total, la cizalladura del viento puede calcularse directamente como se indica en el Capítulo 2, habida cuenta de las deficiencias inevitables de este método. De otro modo, o además, deben analizarse los campos de viento en las cercanías del frente. A este respecto, se observó que el viento geostrófico medido en el sector caliente da una buena estimación de la velocidad y dirección del viento inmediatamente por encima de las superficies del frente frío y del frente caliente por debajo de 500 m (1 600 ft) (lo que proporciona una estimación del viento “en altitud” a los fines de cálculo de la cizalladura para frentes fríos y calientes). Por delante del frente frío, en la masa de aire “frío”, los vientos medios en la superficie son suficientemente representativos del viento por debajo de la superficie frontal (lo que da una estimación del viento “en las capas bajas” para calcular la cizalladura en el caso de un frente caliente). En un frente frío, el viento geostrófico en la masa de aire frío por detrás del frente es más representativo del viento existente por debajo de la superficie frontal que los vientos en la superficie (lo que proporciona una estimación del viento “en las capas bajas” para calcular la cizalladura de un frente frío). Todos los vectores viento “en altitud” y “en las capas bajas” anteriormente indicados, que han sido utilizados para calcular la cizalladura frontal, deberían reducirse a componentes paralelas y normales a la orientación de la pista que sea la más probablemente afectada, o bien debería reducirse del mismo modo la diferencia vectorial final obtenida⁴⁹ (véase 5.1.10). De este modo, la magnitud de la cizalladura se relaciona directamente con los cambios del viento de frente o de cola (velocidad relativa) y con los cambios del viento de costado (ángulo de deriva) que podrían afectar a las aeronaves que utilicen dicha pista.

5.2.21 Ajustándose a los mencionados procedimientos, puede prepararse un pronóstico en que se dé aviso respecto a una cizalladura del viento en un aeródromo entre la superficie y una altura de 500 m (1 600 ft), indicando el período previsto de validez, de ser posible, la diferencia vectorial en nudos prevista a lo largo del frente, expresada en viento de frente o de cola y viento de costado respecto a determinada pista.⁵⁴

Pronósticos de cizalladura del viento relacionadas con frentes de brisa de mar

5.2.22 Según lo expuesto en 3.4.2, aun cuando la brisa de mar implica el desplazamiento del aire caliente o del aire frío, la pendiente de la superficie frontal y los gradientes de temperatura se parecen más

a los de un frente caliente poco profundo que a los de un frente frío (prácticamente un frente caliente moviéndose hacia atrás). En vista de ello, los métodos y criterios de análisis de la cizalladura del viento que acompaña los frentes calientes, expuestos en 5.2.19, pueden aplicarse para analizar los frentes de brisa de mar. Sin embargo, existen varias consideraciones adicionales: principalmente, que la brisa de mar no se produce constantemente por advección en el conjunto del mapa sinóptico, como ocurre con los frentes de masa de aire, y su formación debe pronosticarse cada 24 horas. La formación de la brisa de mar no ocurre de manera sistemática y está sometida, en gran medida, a la situación sinóptica general, así como a influencias locales sutiles (p. ej., la topografía). Por consiguiente, deben tenerse en cuenta variables tales como si el frente se formará efectivamente y, en caso afirmativo, en qué momento, a qué distancia penetrará tierra adentro y cuál será la densidad de la masa de aire procedente de un mar o lago. Una vez que se haya formado el frente de brisa de mar, pueden aplicarse los procedimientos descritos respecto al análisis de un frente caliente. La disponibilidad de información detallada sobre el perfil vertical del viento, la temperatura y la humedad a lo largo del frente de brisa de mar constituye un elemento crítico para pronosticar la cizalladura del viento correspondiente. Esto, a su vez, depende de la disponibilidad de datos representativos de las cercanías proporcionados por una radiovientosonda/globo piloto/SODAR. Además, con objeto de pronosticar con precisión los efectos de la brisa de mar, nada puede reemplazar los conocimientos y la experiencia de las condiciones locales que posea el pronosticador.

5.2.23 En la Figura 5-9 se indica un ejemplo particularmente elocuente de un caso real de un frente de brisa de mar cerca de Boston.^{3,12} Al efectuar una estimación de la cizalladura del viento a lo largo de la superficie frontal en este caso, el viento en superficie en Providence (PVD) se considera como característico del aire caliente por encima de la superficie frontal, aunque hubiese sido preferible utilizar el viento de la cizalladura, lo cual quizá hubiese dado un viento ligeramente más fuerte que el de 30 kt en la superficie. El viento en la superficie en Boston (BOS) se considera como característico del viento por debajo de la superficie frontal. La magnitud de la diferencia vectorial (cizalladura del viento) entre los dos es por lo menos de 40 kt. Las temperaturas de superficie (en grados Fahrenheit) se inscriben también a lo largo del círculo de la estación en la Figura 5-9. Aparte de la cizalladura en la velocidad del viento por encima de la superficie, el cambio repentino en la dirección del viento en la superficie al paso del frente podría también ser muy importante en un aeródromo. Si bien es evidente que este fenómeno tiene suma importancia para los aeródromos costeros, debería observarse que los intensos frentes de brisa marina pueden penetrar hasta 50 km tierra adentro cuando concurren condiciones apropiadas.

Pronósticos de cizalladura del viento ocasionada por la corriente del viento en torno a obstáculos

5.2.24 Aunque la cizalladura del viento ocasionada por particularidades del terreno es notoria por sus variaciones de intensidad y, por consiguiente, suele ir acompañada de CAT, desde el punto de vista de la predicción, es mejor considerarla como no transitoria porque, en determinadas condiciones meteorológicas favorables, este tipo de cizalladura del viento tiende a formarse en determinados lugares en relación con obstáculos y permanecer allí mientras persistan dichas condiciones MET particulares (véase 3.2). Para pronosticar este tipo de cizalladura del viento, además de las predicciones sinópticas generales del viento en el área considerada, es preciso tener un conocimiento a fondo de la topografía local y su efecto en los vientos dominantes. La mejor manera de determinar si un aeropuerto está expuesto a cizalladura del viento ocasionada por el terreno o los edificios consiste en aplicar las técnicas siguientes:

- a) inspección del aeródromo y sus cercanías y análisis de los antecedentes climatológicos disponibles por un meteorólogo aeronáutico de experiencia;
- b) adquisición gradual por los pronosticadores locales de experiencia en el análisis de las corrientes del viento en el área local en diversas condiciones (desde el primer momento, estos aspectos de experiencia deberían agruparse en una nota relativa a las investigaciones técnicas locales);

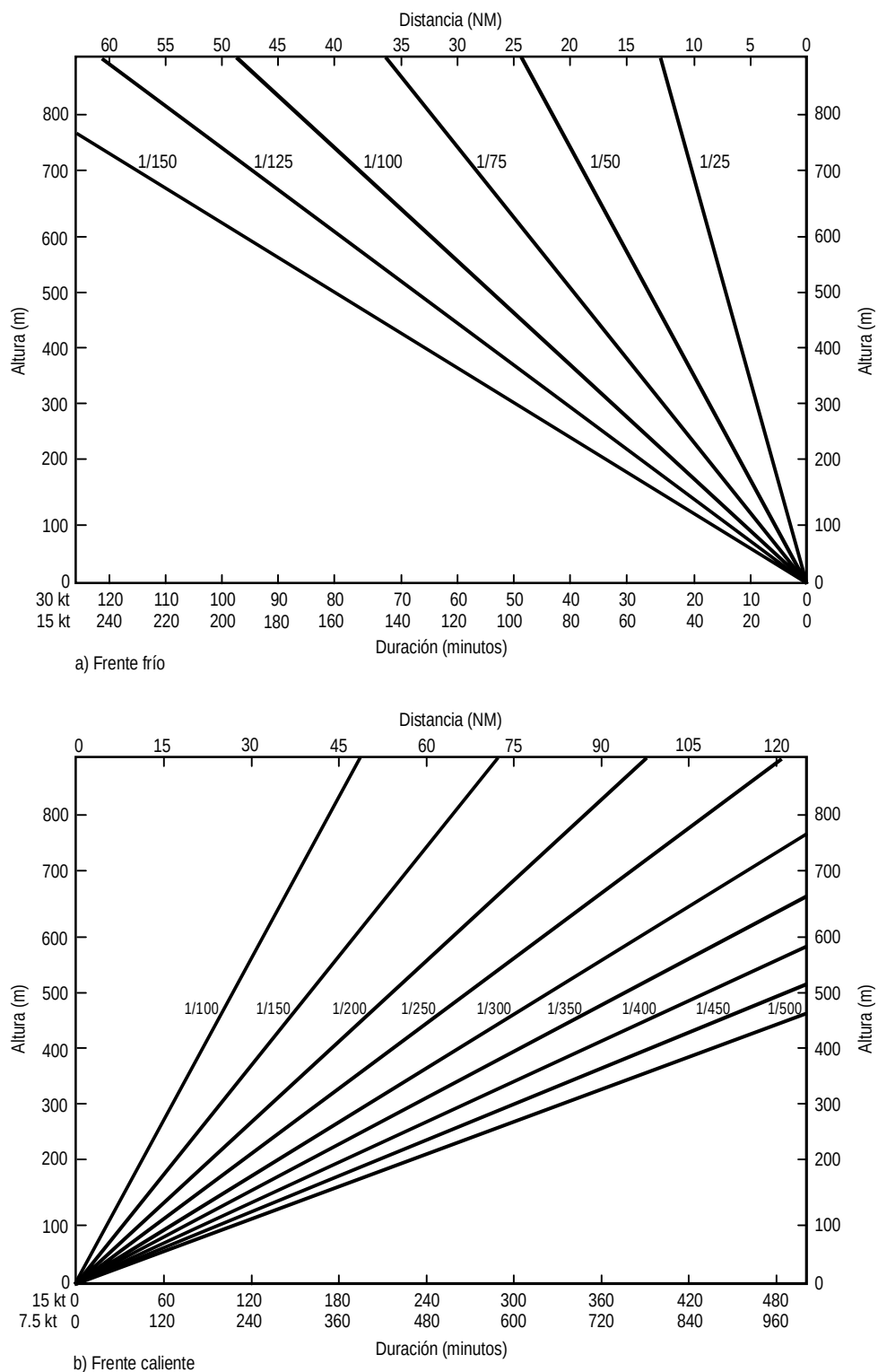


Figura 5-8. Altura de los frentes caliente y frío respecto a la distancia y tiempo en relación con un aeropuerto para diversas pendientes (según Badner, 1979, con adaptación por la OACI)

- c) ensayos sobre el terreno sirviéndose de anemómetros emplazados de manera estratégica (el análisis de sus resultados puede virtualmente efectuarse sea cual fuere el grado de complejidad);⁵⁵
- d) petición de informes de observación del viento a poca altura y de cizalladura del viento o CAT a los pilotos que lleguen al aeródromo y comparación de estos informes de observación con las condiciones locales a la misma hora;
- e) consultas con los controladores de la torre, quienes deben prestar detenida atención a las variaciones caprichosas del viento en la superficie mediante observación de las presentaciones de los anemómetros y de los conos indicadores del viento, etc.; y
- f) en casos especiales en que lo justifique el costo^f (p. ej., Peñón de Gibraltar), pueden efectuarse ensayos hidrodinámicos en modelos a escala o simulaciones con computadoras.

5.2.25 Los datos climatológicos y los datos de los ensayos sobre el terreno pueden analizarse de diversas maneras, desde el análisis periódico de la frecuencia de los vientos hasta el complejo análisis espectral. Uno de los métodos que permite obtener buenos resultados relativamente rápidos consiste en calcular los factores medios de las ráfagas respecto a cada anemómetro instalado (ya se trate de instalaciones permanentes o temporales para ensayos sobre el terreno). El método más simple consiste en calcular la desviación media y la desviación característica de la relación entre la velocidad de la ráfaga y la velocidad media, mensual o anualmente. En la Figura 5-10 se indica un ejemplo de este tipo de análisis (anual) efectuado en el aeropuerto internacional de las Seychelles.⁵⁶ En este ejemplo, aparece claramente que los vientos del sudoeste son realmente muy rafagosos. Esto coincide con el hecho de que es elevado el terreno que se encuentra relativamente próximo al lado oeste del emplazamiento del anemómetro.

5.2.26 Una vez que se conozcan la naturaleza, persistencia y, cuando sea posible, intensidad media de la cizalladura del viento ocasionada por el relieve del terreno o por los edificios próximos a un aeródromo y se hayan determinado las condiciones MET particulares necesarias y suficientes para su formación, puede elaborarse una serie de reglas empíricas de pronóstico aplicables concretamente a cada aeródromo, destinadas a ayudar a los pronosticadores. Debería también incluirse en la publicación de información aeronáutica (AIP) del Estado un breve resumen de las características de esta cizalladura del viento no transitoria que ocurre en determinados aeródromos.

Pronósticos de cizalladuras del viento relacionadas con ondas orográficas

5.2.27 La cizalladura del viento relacionada con ondas orográficas es un caso particular de corriente de aire en torno o por encima de obstáculos (véanse los detalles en 3.2.8 a 3.2.10). En general, esto sólo afecta a los aeródromos situados a sotavento de elevadas y largas cordilleras orientadas a través de los vientos dominantes (p. ej., las Rocosas en el Canadá y los Estados Unidos). Las ondas orográficas suelen formarse normalmente en niveles superiores a 500 m (1 600 ft) a manera de trenes de ondas estacionarias de amplitud decreciente que fluyen hacia sotavento desde la línea de crestas o de determinadas cimas montañosas. Sin embargo, existen circunstancias en que la amplitud del tren de ondas es lo suficientemente grande como para influir en la corriente del viento por debajo de 500 m (1 600 ft). En estos casos, el viento que desciende por la ladera en el lado de sotavento de la cordillera forma parte de la primera onda y, por consiguiente, tiene mayor amplitud y refuerza el efecto usual del viento Foehn (véase 3.2.10).

f. Si bien estos experimentos son normalmente onerosos, no es siempre así; véase, por ejemplo, en la referencia 22 el análisis de las corrientes de aire en Chipre.

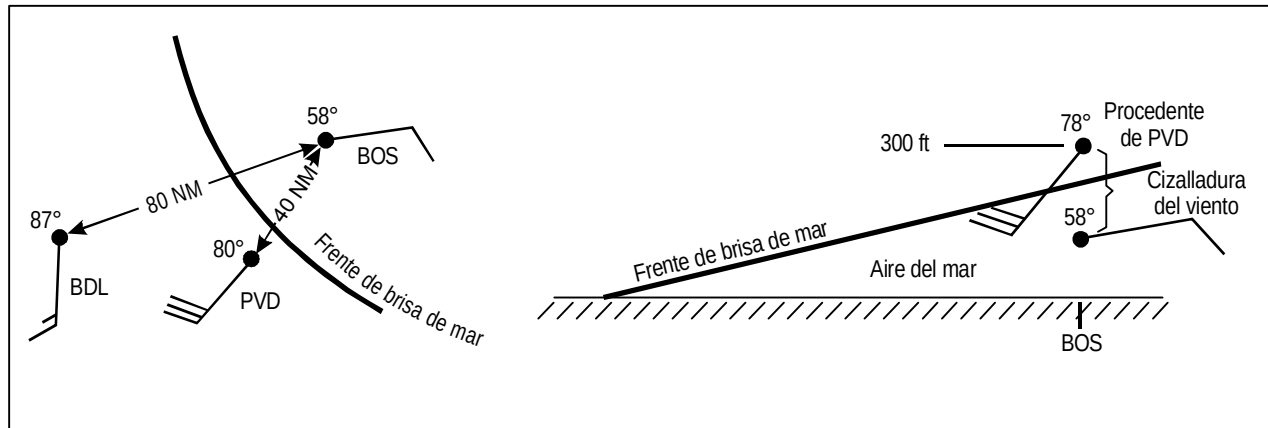


Figura 5-9. Cizalladura del viento relacionada con la brisa de mar
(según Badner, 1979)

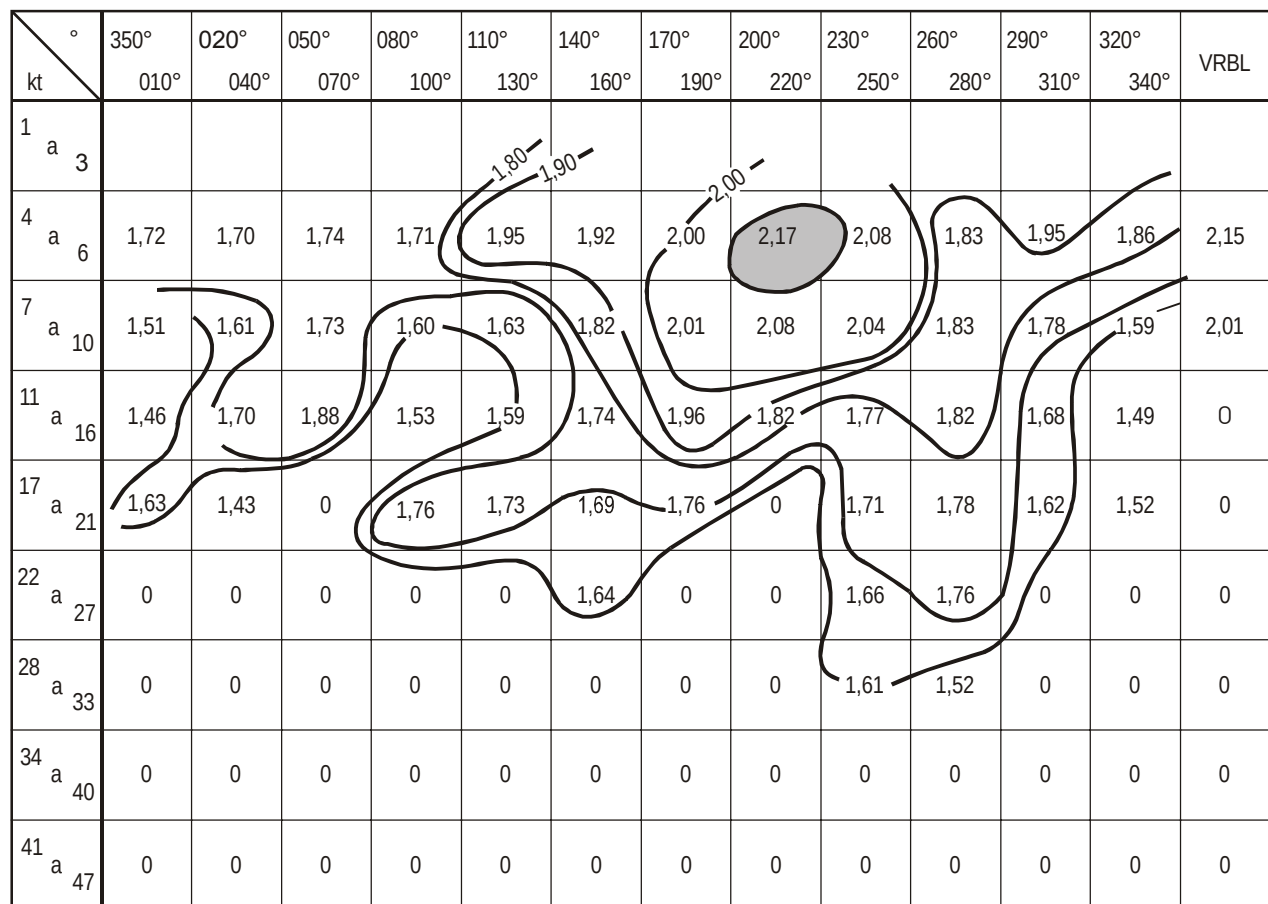


Figura 5-10. Factor medio de ráfagas correspondiente a diversas velocidades (kt) y dirección del viento, Aeropuerto internacional de las Seychelles
(en *Climate of the Seychelles*, 1979)

Esto puede dar lugar a la irrupción repentina de vientos en la superficie que son muy fuertes, rafagosos y apreciablemente calientes y secos. En casos extremos, se han observado velocidades superiores a 200 km/h (100 kt). La presencia de una inversión acentuada de la temperatura a nivel del suelo puede impedir que este viento llegue realmente a la superficie, con lo que se produce una zona de cizalladura en la cima de la capa de inversión. En casos extremos, la amplitud de las ondas puede bastar para que se formen corrientes de remolinos por separado y muy turbulentas, con o sin las correspondientes nubes de remolinos, en la primera cresta de ondas y posiblemente las siguientes. En ciertos casos, dichas corrientes de remolinos se han extendido hasta el nivel del suelo e invertido la dirección habitual del viento en la superficie (véanse las Figuras 3-4 y 5-11). Las intensas corrientes de remolinos pueden contener corrientes descendentes o ascendentes que lleguen hasta 25 m/s (5 000 ft/min).⁵⁷

5.2.28 Pueden pronosticarse los vientos Foehn que descienden por la ladera y las ondas orográficas de tipo normal, aunque a menudo resulta difícil pronosticar cuantitativamente la velocidad real de los vientos y la cizalladura del viento.^{58,59} La presencia de nubes lenticulares y de nubes de remolinos es un indicio inconfundible de la presencia de ondas orográficas. Por lo que se refiere a los pronósticos, debe prepararse una serie de reglas empíricas para cada lugar, que contendrán normalmente criterios basados en lo siguiente:

- la velocidad crítica del viento en la cresta de las montañas (probablemente superior a 15 kt), aumentando la velocidad del viento con la altura;
- una capa contra el viento estable o una inversión por debajo del nivel de 600 hPa y preferiblemente intercalada entre dos capas menos estables;
- vientos flojos en la capa estable;
- la eliminación de la humedad en la ladera a barlovento de la cordillera, en forma de precipitación; y
- la diferencia de presión reducida al nivel medio del mar a lo largo de la cordillera.

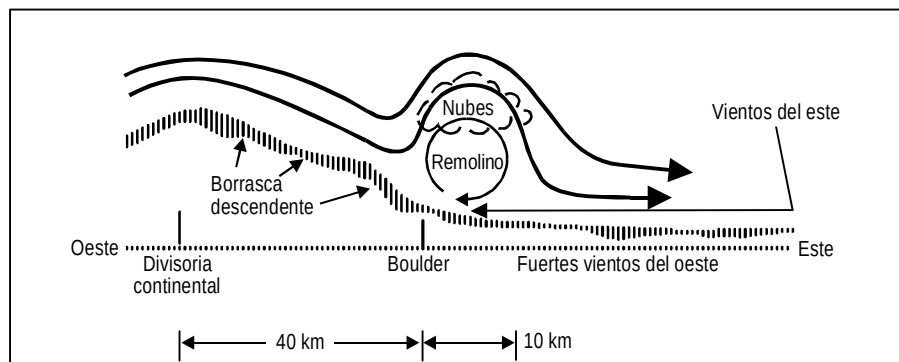


Figura 5-11. Para el 24 de enero de 1982, corte transversal vertical esquemático en Boulder (Colorado, EUA), que se considera característico del campo de la corriente media entre aproximadamente 0900 y 1800 horas locales.

Mientras que los vientos predominaban de una dirección, generalmente del este, en una zona alrededor de Boulder, se observaron vientos fuertes del oeste a 2–3 km por encima del terreno en nubes stratocúmulus que se formaban sistemáticamente al oeste, cerca de la ciudad.

(según Zipser y Bedard, 1982, con adaptación por la OACI)

Un monograma simple pero eficaz para pronosticar el desarrollo y la intensidad de ondas orográficas se basa en dos de estos factores: diferencia de presión reducida al nivel medio del mar a lo largo de la cordillera y velocidad normal del viento en la cordillera.^{60,61} En el caso de cordilleras orientadas de norte a sur, el paso de un frente frío puede desencadenar fuertes ondas orográficas.

5.2.29 En la mayoría de las circunstancias, los pronósticos de cizalladura del viento asociada con ondas orográficas daría lugar a mensajes SIGMET o AIRMET, o los dos. En el Anexo 3, Capítulo 7, se indican los requisitos para expedir tales mensajes. A este respecto, en el Anexo 3, Apéndice 6 — Especificaciones técnicas relativas a información SIGMET y AIRMET, avisos de aeródromo y avisos de cizalladura del viento, 4.2.8, se define también la intensidad de las ondas orográficas como se indica a continuación:

“Las ondas orográficas (MTW) deberían considerarse como:

- a) fuertes, cuando se observa o se pronostica una corriente descendente adjunta de 3,0 m/s (600 ft/min) o más o si se observa o pronostica turbulencia fuerte; y
- b) moderadas, cuando se observa o pronostica una corriente descendente de 1,75–3,0 m/s (350–600 ft/min) o cuando se observa o pronostica turbulencia moderada.”

Pronósticos de cizalladura del viento asociada con vientos catabáticos

5.2.30 Este tipo de corriente de viento es de especial interés para los aeródromos situados en un valle. Entre las condiciones MET propicias para su formación figuran noches claras y calmas bajo los efectos de un anticiclón (véase 3.2.7). La irrupción y la fuerza del viento catabático local puede normalmente pronosticarse con relativa precisión basándose en reglas empíricas establecidas para cada lugar. Aparte de su evidente importancia para el pronóstico de los cambios del viento en la superficie en el aeródromo, el propio viento catabático no constituye de por sí ningún problema en la mayoría de los aeródromos, salvo en casos extremos. En estos casos, tales como en áreas en que las mesetas del interior se encuentran situadas cerca de regiones costeras, y especialmente en invierno en fuertes condiciones anticiclónicas, el aire por encima de la costa es apreciablemente más caliente que el aire intensamente frío por encima de la meseta. Si el gradiente de presión está dispuesto de modo que fuerza al aire frío a descender a lo largo de las laderas de la meseta, los vientos fríos rafagosos muy fuertes y de velocidades cada vez mayores soplan por la planicie costera y hacia el mar, alcanzando a veces velocidades superiores a 200 km/h (100 kt) (p. ej., el “Bora” del Adriático).

5.2.31 Sólo es probable que se produzca cizalladura del viento local significativa por encima del nivel del suelo, debida a los vientos catabáticos normales que descienden por la ladera, si la inversión en la superficie que se forma durante la noche es lo suficientemente fuerte para impedir la mezcla en los niveles inferiores de la atmósfera.⁶² En estas condiciones se forma un “pantano estancado” de aire frío en el fondo del valle, que finalmente impide al viento descendente por la ladera subsiguiente que llegue hasta la superficie, lo que le hace deslizarse a lo largo de la cima de la inducción. Esto da lugar a una situación en que el viento en la superficie está mayormente en calma o sopla ligeramente, con una zona de cizalladura en la cima de la inversión [habitualmente entre 75 m (250 ft) y 150 m (500 ft) AGL].⁶³ Después de la salida del sol, la inversión se eleva y debilita y la zona de cizalladura también se eleva. Los vientos por encima de la inversión aumentan frecuentemente después de la salida del sol, lo que da por resultado que, a medida que se eleva la zona de la cizalladura del viento, éste puede también intensificarse poco después del amanecer. Puede obtenerse una estimación de la cizalladura del viento de la diferencia vectorial entre los vientos en la cresta y el viento en la superficie en el fondo del valle. Todo valor superior a 5 kt/30 m es probable que tenga efectos significativos en las operaciones de las aeronaves.

Pronósticos de la cizalladura del viento asociada con corrientes en chorro a poca altura

5.2.32 Se utiliza la expresión “corriente en chorro a poca altura” para describir este fenómeno, puesto que se origina en la forma de una banda larga y estrecha de vientos fuertes cuyas líneas de corrientes y las isotacas se parecen a las de las corrientes en chorro que se encuentran a los niveles superiores de la atmósfera. Como se describe en 3.1.5, el eje de la corriente en chorro a poca altura suele situarse por debajo de los 500 m (1 600 ft), aunque el eje tiende en realidad a elevarse gradualmente después de su formación inicial. Ésta depende de varios factores, el más importante de los cuales es el rápido enfriamiento nocturno que ocurre en la superficie. Se forma después de la puesta del sol y alcanza su punto máximo cerca del amanecer,⁶⁴ a las horas en que, según la longitud geográfica del aeródromo, puede o no coincidir con la disponibilidad de información detallada sobre la temperatura y el viento a poca altura proporcionada por radiovientosondas lanzadas entre las 0000 y las 1200 UTC. El empleo de SODAR Doppler es particularmente conveniente para seguir la evolución de la inversión a poca altura y la medición del perfil del viento a poca altura, hora tras hora, directamente por encima del aeródromo (véase 5.1.18).

5.2.33 Se han elaborado varias reglas empíricas de pronóstico para los aeródromos afectados por corrientes en chorro a poca altura. Si se dispone de información procedente de una radiovientosonda local cerca del momento de formación de dicha corriente, entonces pueden formularse reglas relativamente detalladas. De lo contrario, pueden aplicarse las reglas siguientes propuestas por Badner⁴⁹ para su utilización en los Estados Unidos:

- a) La nubosidad debería ser escasa, produciendo el calentamiento diurno un gradiente térmico inestable en la proximidad del suelo durante la tarde. Es conveniente una inversión cerca del nivel de 850 hPa para superar la inestabilidad a poca altura. Estas condiciones pueden determinarse de la observación anterior por radiovientosonda y de la temperatura máxima durante la tarde.
- b) Los vientos de superficie deberían soplar del sector sur con una velocidad próxima a la geostrofica, según se determine de la separación isobárica en los mapas de superficie de la tarde ≥ 40 km/h (≥ 20 kt). El gradiente de presión no debería descender por debajo de la separación suficiente para producir la velocidad máxima del viento de 40 km/h (20 kt) durante la noche.
- c) La velocidad del viento debería disminuir con la altura por encima de la inversión a poca altura en la capa más baja de 900 m (3 000 ft) alrededor de la puesta del sol. Este fenómeno puede ser evidente basándose en la información más reciente relativa a los vientos en altitud.
- d) Puede determinarse la diferencia vectorial aproximada, por un lado, entre la dirección y la velocidad del viento en la superficie observada cerca de la puesta del sol y, por otro, la dirección medida geostroficamente y 1,5 veces la velocidad medida según el gradiente de presión en el último mapa disponible de análisis de superficie. Si la diferencia vectorial es superior a 30 kt, entonces podría producirse una cizalladura del viento significativa. Supóngase luego que es necesaria una diferencia vectorial mínima de 30 kt en la capa desde el nivel de observación del viento en la superficie hasta la altura supuesta de la corriente en chorro a poca altura de 360 m (1 200 ft) para producir una pérdida media de la cizalladura vertical del viento de 4 kt/30 m, $\frac{30 \text{ kt}}{350 \text{ m}} = 30 \times \frac{30}{350} = 30 \times 0,086 = 26 \text{ kt}/30 \text{ m}$.

Esta cizalladura media en la capa de 350 m de espesor indica que la cizalladura será por lo menos el doble en los 90 m (300 ft) más bajos.

PRONÓSTICOS DE LA CIZALLADURA DEL VIENTO TRANSITORIA

Pronósticos de cizalladura del viento asociada con nubes de convección

Generalidades

5.2.34 Es sumamente difícil pronosticar la cizalladura del viento a poca altura asociada con nubes de convección, especialmente tormentas en estado de madurez, que tiene importancia crítica para la aviación. Además es necesario pronosticar las nubes de convección, particularmente las tormentas, en el área de interés, pero esto no es suficiente en el caso de la cizalladura del viento a poca altura. En 3.5 se describen en detalle los diversos tipos de cizalladura del viento a poca altura de interés para la aviación que pueden estar asociados con tormentas, incluidos frentes de ráfagas, ráfagas descendentes, microdescendentes y tornados. No obstante, no todas las tormentas producen necesariamente tales cizalladuras del viento, mientras que, a veces, las producen nubes de convección de origen no tormentoso.

5.2.35 Si se pronostica que nubes de convección y especialmente tormentas afectarán a un aeródromo, entonces existe la posibilidad evidente de que se produzca cizalladura del viento a poca altura asociada con nubes cumulonimbus, lo que los pilotos deberían comprender. Si se pronostican violentas tormentas, líneas organizadas o extensas áreas de tormentas, entonces aumenta apreciablemente la probabilidad de que se produzcan uno o todos los tipos críticos de cizalladura del viento a poca altura que se acaban de mencionar. Sin embargo, las manifestaciones más extremas de las tormentas, tales como microdescendentes y tornados, que teóricamente pueden acompañar a cualquier tormenta violenta, tienden a predominar especialmente en determinadas regiones del mundo que parecen ser particularmente propicias para su formación. El pronóstico de la formación de tormentas ha sido siempre una de las tareas más importantes del meteorólogo y son bien conocidas las técnicas de pronóstico necesarias y, especialmente en la escala sinóptica, se obtienen resultados bastante satisfactorios. En el pronóstico de violentas tormentas en el ámbito local ha venido siendo objeto de creciente atención durante los últimos decenios, debido principalmente a la amenaza que suponen para la vida y a los horrendos daños que los fuertes vientos, la lluvia torrencial, el granizo y los tornados pueden ocasionar en las poblaciones. Las técnicas que se están perfeccionando aumentan cada vez más la confusión para distinguir entre observaciones y pronósticos, debido a que se basan en gran medida en el conocimiento detallado del estado en que se encuentra, minuto por minuto, la atmósfera en determinado lugar. En caso extremo, el pronóstico puede constituir no más de una advertencia de tan sólo unos cuantos minutos críticos. Se ha dado a estas técnicas el nombre de “predicción inmediata” (*nowcasting*), expresión que Browning⁶⁵ explicó del modo siguiente:

La expresión “predicción inmediata” representa un método que se basa en gran medida en las observaciones para preparar pronósticos locales sirviéndose oportunamente de datos actualizados en que la teledetección desempeña una función preponderante ... La propia expresión “predicción inmediata” crea una imagen viva de un método de predicción que depende más de lo usual de la descripción del estado actual [de la atmósfera] Los fenómenos meteorológicos que son objeto de predicción inmediata se relacionan con sistemas mesoescalares. La mesoescala se encuentra entre la escala sinóptica y la escala cúmulos: de ahí su nombre. Su dimensión puede variar entre unos pocos kilómetros y varios centenares de kilómetros, cuyas escalas cronológicas varían entre una hora y un día. Los frentes, sistemas tormentosos y diversas clases de efectos ocasionados por la topografía del terreno local, ocurren todos en la mesoescala.

La Organización Meteorológica Mundial (OMM)⁶⁶ ha definido “predicción inmediata” en el sentido de que forma un subgrupo de “predicción a corto plazo” y que se trata de “una descripción del tiempo actual y predicción de 0 a 2 horas”. Esto es esencialmente la definición de “pronóstico de aterrizaje de tipo tendencia” previsto en el Anexo 3, Capítulo 6, lo que hace que las predicciones inmediatas sean especialmente apropiadas para fines aeronáuticos.

5.2.36 Respecto a tormentas violentas y tormentas organizadas en líneas o áreas (estos últimos dos tipos de tormentas pueden también comprender tormentas violentas aisladas), las técnicas de pronósticos locales eficaces de formación de tormentas (cambios en su intensidad y extensión) y movimiento, ya se trate de predicción inmediata o de otro tipo de pronóstico, suelen basarse en información obtenida de una o todas las fuentes siguientes:

- a) observación visual directa;
- b) radar meteorológico (desde instalaciones de un solo radar que funciona en una longitud de onda de 3 cm hasta redes organizadas de radares de 10 cm);
- c) observaciones sinópticas e informes de aeronaves;
- d) observaciones recibidas continuamente en tiempo real de sistemas de observación mesoescalar (incluidas estaciones automáticas instaladas estratégicamente);
- e) mayor frecuencia o densidad de los sondeos de radiovientosonda o globo piloto;
- f) datos meteorológicos obtenidos por satélites (incluso fotografías semihorarias de la distribución de nubes y de vapor de agua y perfiles verticales de temperatura y humedad);
- g) radar Doppler (incluso instalaciones múltiples);
- h) SODAR;
- i) sistemas de detección y localización de relámpagos en tiempo real; y
- j) procesamiento y presentación automática en tiempo real de datos procedentes de las mencionadas fuentes.⁶⁷

Pronósticos de ráfagas, frentes de ráfagas, ráfagas descendentes y microdescendentes y tornados

5.2.37 Cabe prever, sin excepción alguna, que todas las tormentas produzcan ráfagas en el viento en la superficie. Existen varias reglas empíricas de predicción para pronosticar la velocidad máxima probable de dicho viento, especialmente en el caso de tormentas de masa de aire; la mayoría de estas reglas se basa en la estimación de la diferencia entre la temperatura en la superficie antes y después de la irrupción de la corriente descendente rafagosa procedente de la tormenta. En el método de Fawbush y Miller se utilizan los sondeos más recientes disponibles y representativos trazados en un diagrama termodinámico normalizado (p. ej., tefigrama). Las temperaturas de termómetro húmedo se calculan y trazan en el diagrama hasta el nivel de engelamiento. El punto en que la curva de termómetro húmedo llega a 0°C (denominado a veces “nivel de congelación de termómetro húmedo”) se reduce a la superficie a lo largo de una línea adiabática saturada. Luego se resta la temperatura de este último punto de la temperatura en superficie observada o de la temperatura pronosticada antes de la irrupción de la tormenta. La diferencia es proporcional a la ráfaga máxima, según se indica en el gráfico de la Figura 5-12.^{g,68} El pronóstico de la dirección de las ráfagas es un tanto más difícil, aunque, en términos generales, la dirección media del viento en la capa situada entre 700 y 600 hPa da una buena indicación. La observación del movimiento de la tormenta en los radares facilita a menudo la estimación de la dirección probable de las ráfagas.⁶⁹ Tras haber pronosticado la ráfaga máxima probable, no puede garantizarse que afecte a determinada área situada en la trayectoria de la tormenta, tal como un aeródromo.

5.2.38 Las reglas empíricas utilizadas para pronosticar ráfagas de las tormentas descritas más arriba se aplican generalmente al área situada inmediatamente en torno a las tormentas de masa de aire. Las tormentas violentas y las tormentas frontales o líneas de turbonada suelen producir el sistema más

g. Denominado a veces índice Delta T.

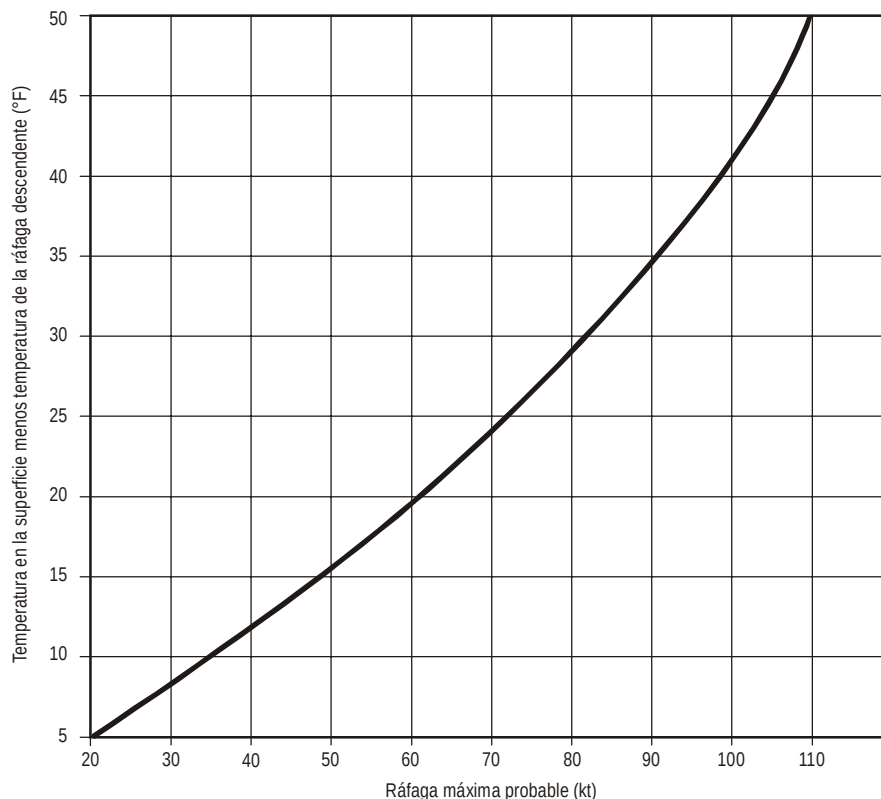


Figura 5-12. Pronósticos empíricos de ráfagas máximas probables
(según George, 1960)

organizado y de mayor propagación de ráfagas conocidas con el nombre de “frentes de ráfagas”, que pueden alcanzar velocidades de ráfagas mucho más elevadas y pueden, a veces, avanzar hasta 35 km (19.5 NM) por delante de la tormenta o de la línea de turbonada que las ha producido (véase 3.5.2). Las ráfagas ocasionadas por tormentas surgen de corrientes descendentes frías que penetran la base de las nubes acompañadas o no de intensas lluvias. El frente de ráfagas proviene de corrientes descendentes especialmente fuertes que llegan al suelo y que, cuando los vientos divergentes en la superficie son de tal intensidad que pueden causar considerables daños, fueron definidos como “ráfagas descendentes” por Fujita (véase 3.5.3). Es difícil pronosticar la velocidad máxima probable de una ráfaga ocasionada por un frente de ráfagas, pero si pueden determinarse la velocidad y orientación de este último basándose en su paso por estaciones de observación o sirviéndose de radar, etc., entonces la velocidad máxima del viento normal al frente de ráfagas, cerca del suelo, será aproximadamente 1,5 veces la velocidad del frente de ráfagas. Resulta también difícil decidir si en realidad una tormenta producirá o no frentes de ráfagas. Se ha propuesto que se emplee como criterio reflectividades centrales radar procedentes de la tormenta superiores a 40 dBZ (lo que equivale a una precipitación de más de una pulgada por hora).⁷⁰ Pueden también aplicarse las técnicas de pronóstico de la formación de ráfagas descendentes que se examinan en 5.2.39, puesto que los frentes de ráfagas nacen de ráfagas descendentes. Siempre debería preverse que los frentes de ráfagas precedan a las líneas de turbonada y se formen en áreas organizadas de tormentas activas. Como se indica en 3.5.10 y 5.1.5, el frente de ráfagas aparece de vez en cuando en los radares meteorológicos convencionales de dBZ, especialmente en el radar de 10 cm dispuesto para recibir ecos más débiles de lo habitual (hasta ≤ 10). El seguimiento de estos ecos radar permite hacer pronósticos muy precisos; desafortunadamente, no todos los frentes de ráfagas producen ecos tan fáciles de identificar. La observación de nubes rollo de frentes de ráfagas en los satélites meteorológicos (véanse 5.1.6 y Figura 5-11), aunque excepcional, puede también servir de base para un pronóstico preciso.

La utilización de una red de sensores del viento por el perímetro de un aeródromo para detectar frentes de ráfagas tales como el LLWAS instalados en numerosos aeródromos de los Estados Unidos, se describe en detalle en 5.1.7 a 5.1.14. Este sistema fue inicialmente diseñado para producir avisos a corto plazo de frentes de ráfagas y microrráfagas que cruzan el perímetro del aeródromo y funciona bien a este fin.

5.2.39 Las técnicas de “predicción inmediata” generalmente disponibles para pronosticar tormentas que puedan producir ráfagas descendentes (y, por consiguiente, frentes de ráfagas), microdescendentes y tornados, dependen en gran medida de la interpretación de las características de los ecos en el radar convencional, es decir no Doppler, así como en las características de las fotografías de las cimas de las nubes de las imágenes infrarrojas obtenidas por satélites meteorológicos geoestacionarios. Se han analizado desde los años cincuenta las características de los ecos en los radares convencionales inherentes a tormentas violentas; la colección de tipos identificables incluye ahora “ecos altos”, “ecos en forma de gancho”, “ecos en forma de arco”, “ecos en forma de coma” y “ecos en forma de punta de lanza”. En la Figura 5-13 a) se indican en un diagrama los ecos en forma de gancho y de arco y posibles áreas de ráfagas descendentes;⁷⁰ en la Figura 5-13 b) se indican la evolución característica de los ecos radar en las diversas etapas y la ubicación de las ráfagas descendentes. El concepto de “ecos en punta de lanza” fue introducido por Fujita y Byers en sus análisis (1976) de los aspectos MET del accidente de Eastern Airlines ocurrido en el Aeropuerto internacional JFK, de Nueva York, en 1975. En la Figura 5-14 se presentan las vistas en planta y en elevación de un eco en forma de punta de lanza;⁷¹ debería también establecerse la comparación con la Figura 3-11. En la Figura 5-15 se indican las vistas en planta y en elevación de las cimas de nubes características obtenidas de imágenes infrarrojas de las tormentas que producen ráfagas descendentes⁷⁰. No siempre resulta fácil identificar estas configuraciones de ecos radar y su ausencia no excluye la posibilidad de que se formen tormentas violentas. Véanse las referencias 49, 70 y 74 al final del presente capítulo para los pormenores sobre la interpretación y pronóstico de tormentas severas sirviéndose de estas técnicas.

5.2.40 Según lo descrito en 5.1.32, el ITWS abarca una variedad de productos, la mayoría de los cuales podría clasificarse como predicciones instantáneas. El estudio publicado por Browning en 1983⁶⁵ relativo a la situación y el futuro progreso de la predicción instantánea, se ha realizado en gran medida en el ITWS y otros sistemas integrados MET de observación, pronóstico y aviso.

5.3 NOTIFICACIÓN DE CIZALLADURA DEL VIENTO

GENERALIDADES

5.3.1 Los primeros dos párrafos de la exposición de requisitos operacionales que figura en el Apéndice 1 tratan de la necesidad de transmitir a los pilotos información sobre cizalladura del viento y turbulencia a poca altura. A primera vista, el procedimiento utilizado para proporcionar a los pilotos la información disponible sobre cizalladura del viento no parece ser muy diferente a los que se utilizan para proporcionar información sobre cualquier otro fenómeno meteorológico peligroso a poca altura. Sin embargo, en la práctica existen varias dificultades poco habituales que vale la pena examinar a fin de dar al personal operacional una idea al respecto.

5.3.2 Actualmente, la información sobre cizalladura del viento a poca altura en los aeródromos puede obtenerse de los informes de los pilotos durante el aterrizaje y el despegue, basados en observaciones visuales directas efectuadas en tierra, de los pronósticos preparados con arreglo a la información MET general o sirviéndose de instrumentos o de sistemas de instrumentos especializados instalados en el aeródromo. En la Figura 5-16 se ilustra en forma de diagrama la transmisión de información sobre cizalladura del viento. Esencialmente, la transmisión de información sería también aplicable a otros fenómenos meteorológicos peligrosos a poca altura notificados por los pilotos o que se comuniquen a éstos.

5.3.3 Los motivos de las dificultades particulares que plantea el suministro a los pilotos de información sobre cizalladura del viento pueden reunirse en dos categorías principales: “factor tiempo” y “terminología”. El factor tiempo es importante porque la cizalladura del viento a poca altura más peligrosa pertenece al tipo transitorio, que puede relacionarse con cualesquiera nubes de convección, pero especialmente con tormentas. La duración de las microdescendentes (la manifestación invisible más peligrosa de la cizalladura del viento que acompaña a una tormenta) suele ser inferior a 15 minutos. Durante el proyecto JAWS, el 50% de las 40 microdescendentes examinadas por radar Doppler alcanzaron su intensidad máxima en menos de 5 minutos después de haberse detectado, mientras que el 95% llegó a su intensidad máxima en menos de 10 minutos a partir del momento en que la corriente divergente llegaba al suelo (véanse 3.5.16 y Figura 3-16). Algunas se disiparon en 5 a 10 minutos, durante cuyos períodos la diferencia máxima de la velocidad del viento de un extremo a otro de la microdescendente aumentaba pasando de 50 a 100 km/h (25 a 50 kt). Se trata de fenómenos de reducida escala, cuyo diámetro es de tan solo 1,8 km cuando son inicialmente detectados y se desarrollan para llegar solamente a 3,1 km como media en unos 6,4 minutos. Lo expuesto ilustra la dificultad que entraña el factor tiempo: para ser eficaces, las aeronotificaciones y los avisos relativos a cizalladura del viento deben transmitirse a las aeronaves con la mínima demora posible.

5.3.4 Las dificultades relativas a la segunda categoría, terminología, se deben en gran parte a la complejidad intrínseca del tema y la falta de equipo operacional que permita detectar y medir la cizalladura del viento en unidades y clases de intensidad que sean fácilmente comprensibles por un piloto desde el punto de vista de la actuación del tipo de aeronave de que se trate. Por ejemplo, el hecho de avisar a un piloto acerca de la presencia de lluvia engelante en la trayectoria de aproximación le proporciona información suficiente para que tome medidas apropiadas. Si se le avisa que se prevé cizalladura del viento o que se ha notificado en la trayectoria de aproximación, al menos se alerta al piloto, aunque surge así una serie de cuestiones en la mente del piloto, p. ej., de qué tipo de cizalladura se trata, cuál es su intensidad y su altura. No se trata de cuestiones ligeras, puesto que las medidas que el piloto debería tomar dependen de las respuestas al respecto.

5.3.5 Dos ejemplos de dificultades de terminología ilustrarán este punto. Como se describe en el Capítulo 4, la cizalladura del viento puede aumentar la actuación aparente de la aeronave (aumento del viento de frente, disminución del viento de cola o corrientes ascendentes) o bien reducir la misma (por disminución del viento de frente, aumento del viento de cola o corrientes descendentes). Sería simple, directo o informativo calificar estos tipos de cizalladura del viento como “cizalladura del viento positiva” y “cizalladura del viento negativa”, respectivamente. Desde el punto de vista teórico, la idea es atractiva y conveniente; desde el punto de vista de los pilotos, esas expresiones permiten establecer una relación inmediata con la actuación potencial, aplicable a todas las aeronaves. Desafortunadamente, en inglés la expresión “cizalladura del viento negativa” puede significar también que “no hay cizalladura del viento”, lo que podría tener consecuencias desastrosas. Incluso agregando palabras tales como “tipo” (con lo que se formaría la expresión “cizalladura del viento de tipo negativo”) para superar esta dificultad no se quedaría a salvo de errores, puesto que la utilización de la palabra “tipo” por sí sola podría no comprenderse durante la transmisión o suprimirse deliberadamente debido a la tendencia natural de acortar las expresiones utilizadas en radiotelefonía. El Grupo de estudio sobre la cizalladura del viento y la turbulencia a poca altura (WISTSG) propuso otros términos: “efecto de aterrizaje demasiado largo” (*overshoot*) y “efecto de aterrizaje demasiado corto” (*undershoot*). Estas expresiones son más largas, pero los pilotos las comprenden inmediatamente. Inicialmente, en inglés estas expresiones originaban alguna dificultad, puesto que si el piloto comprendía bien la palabra “*overshoot*”, podía interpretarla en el sentido de que se trataba de una instrucción del ATC para el procedimiento “motor y al aire”. Esta posibilidad de confusión ha sido ya eliminada al introducir la OACI las expresiones “procedimiento de aproximación frustrada” y procedimiento de “motor y al aire”.

5.3.6 La dificultad para resolver los problemas de clasificación de la intensidad de la cizalladura del viento, cuestión que se trata en 5.2.5 a 5.2.14, significa que la utilización de calificativos tales como ligera, moderada, fuerte y muy fuerte, basados en criterios cuantitativos acordados, no se recomienda actualmente

en el Anexo 3, Capítulo 7, para avisos de cizalladura del viento. Los criterios provisionales para la notificación de cizalladura del viento recomendados por la 5ª Conferencia de navegación aérea (Montreal, 1967) constituyen orientación y los Estados pueden utilizarlos a su discreción en la inteligencia de que, a pesar de que tienen algunos inconvenientes, un análisis reciente de datos mundiales sobre cizalladura del viento efectuado por el RAE ha puesto de manifiesto que los criterios provisionales, respecto a la cizalladura en las componentes horizontales del viento, pecan, probablemente, de prudentes⁷² [véanse Tabla 5-4 y 5.2.6 e), respectivamente].

INFORMES DE AERONAVES SOBRE CIZALLADURA DEL VIENTO

5.3.7 Habida cuenta de la falta de equipo de teledetección para detectar y medir la cizalladura del viento a poca altura, la información sobre cizalladura del viento se basa en gran medida en aeronotificaciones, situación que se reconoce en el Anexo 3, Capítulos 4 y 7. Dichas aeronotificaciones deberían comunicarse de conformidad con las disposiciones del Capítulo 5, 5.6, del Anexo 3. Dado que puede constituir la única fuente de información, la notificación de cizalladura del viento por los pilotos es de vital importancia para garantizar la seguridad de otras aeronaves. Idealmente, los pilotos deberían proporcionar el mayor volumen posible de información pertinente para ayudar a otros pilotos a evaluar el efecto probable de la cizalladura del viento en sus propias aeronaves. Sin embargo, debe también reconocerse que una cizalladura del viento es un fenómeno dinámico que supone una carga de trabajo elevada en el puesto de pilotaje durante un período muy breve de tiempo, por lo que no es realista esperar que los pilotos puedan presentar informes detallados en todos los casos.

5.3.8 Se ha elaborado, con la ayuda del Grupo de estudio WIST, orientación destinada a los pilotos para ayudarles a preparar informes sobre cizalladura del viento. Esta orientación se basa en la hipótesis de que los pilotos proporcionarán tanta información pertinente como sea posible, teniendo en cuenta la carga de trabajo en el puesto de pilotaje en el momento del suceso (y también de los recursos disponibles para preparar y transmitir el informe), así como el equipo especial que se lleve a bordo, mediante el cual puede obtenerse información sobre cizalladura del viento. Teniendo presentes las mencionadas condiciones, las aeronotificaciones deberían contener la información siguiente:

- a) descripción lo más concisa posible del suceso, que comprenda especialmente la utilización de la expresión “cizalladura del viento”, así como una evaluación subjetiva de su intensidad, sirviéndose de los calificativos “ligera”, “moderada”, “fuerte” y “muy fuerte”, según el caso. [Esto equivale a una descripción de la cizalladura del viento en una escala (subjetiva) de 1 a 10, con arreglo a las reacciones de la aeronave ante la cizalladura]. Otra solución consistiría en presentar informes basados en los hechos en lenguaje claro (es decir, con las propias palabras del piloto) respecto a los cambios de velocidad relativa o velocidad respecto al suelo y los efectos de aterrizaje demasiado corto o demasiado largo o, en los casos en que sólo sea posible un aviso mínimo, un simple informe de “cizalladura del viento”;
- b) tipo de aeronave, de conformidad con el Anexo 3, Capítulo 5;
- c) altura o banda de altura a la cual se ha encontrado cizalladura del viento;
- d) fase de vuelo, si no es evidente; y
- e) información MET y operacional detallada apropiada. A este respecto, las aeronaves equipadas con sistemas de navegación apropiados que encuentren cizalladura del viento deberían, de ser posible, notificar cualquier otra información pertinente, como cambios importantes de dirección o velocidad del viento.

5.3.9 Se ha elaborado asimismo, con la asistencia del Grupo de estudio WIST, orientación sobre los términos relativos a cizalladura del viento, cuyo uso se recomienda para comunicaciones aeroterrestres. Basándose en dicha orientación, se indican a continuación modelos de informes:

- a) informes mínimos cuando no se dispone de tiempo o información suficiente para dar detalles más amplios:

“[distintivo de llamada] CIZALLADURA DEL VIENTO B737 EN APROXIMACIÓN (RWY36)”; o

“[distintivo de llamada] CIZALLADURA DEL VIENTO FUERTE B737 EN APROXIMACIÓN (RWY36)”; o

“[distintivo de llamada] CIZALLADURA DEL VIENTO A340 EN APROXIMACIÓN (RWY28)”; o simplemente

“[distintivo de llamada] CIZALLADURA DEL VIENTO”; y

- b) otros informes más amplios cuando se dispone de suficiente tiempo e información:

“[distintivo de llamada] CIZALLADURA DEL VIENTO MODERADA B747 A 150 FT EN APROXIMACIÓN (RWY36) PERDIÓ 10 KT (VELOCIDAD RELATIVA)”; o

“[distintivo de llamada] CIZALLADURA DEL VIENTO FUERTE B747 EFECTO DE ATERRIZAJE DEMASIADO CORTO ENTRE 300 FT Y 600 FT TRANSITORIAMENTE INCAPAZ DE MANTENER ASCENSO A LA SALIDA (RWY13)”; o

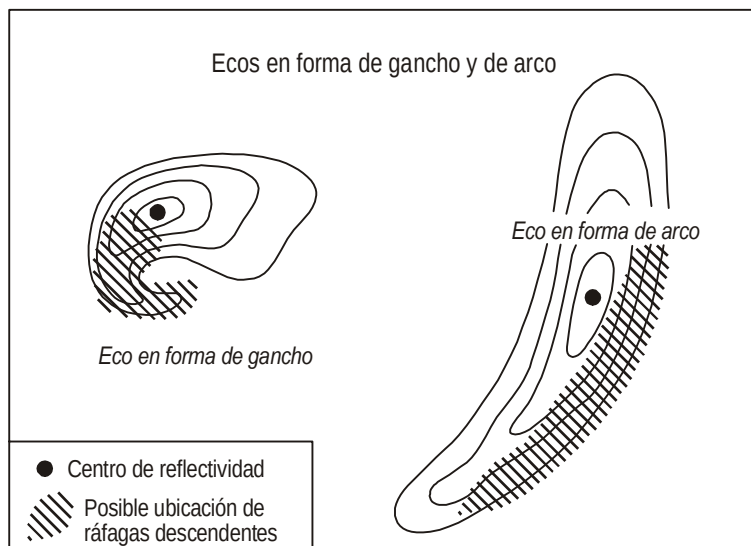
“[distintivo de llamada] CIZALLADURA DEL VIENTO FUERTE A320 EN APROXIMACIÓN (RWY26) VIENTO 350° 45 KT A 500 FT PASANDO A 230° 10 KT A 200 FT”.

NOTIFICACIÓN DE CIZALLADURA DEL VIENTO POR LOS SERVICIOS DE TRÁNSITO AÉREO (ATS)

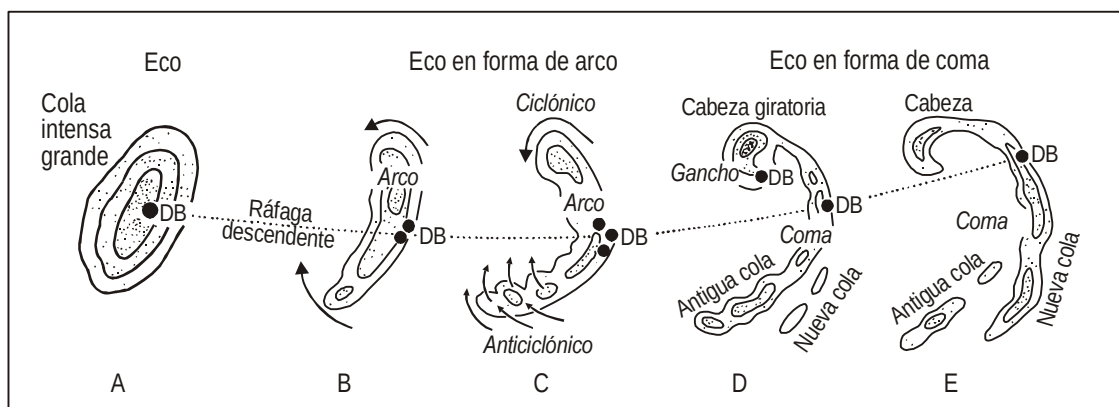
5.3.10 Como se indica en la Figura 5-16, las dependencias ATS constituyen el enlace crítico de comunicaciones entre aeronaves y entre aeronaves y dependencias MET. Al recibir una aeronotificación de “cizalladura del viento”, la dependencia ATS interesada debería:

- a) transmitir inmediatamente el informe a otras aeronaves interesadas;
- b) incluir un informe en la radiodifusión del servicio automático de información terminal (ATIS) (si existe); y
- c) transmitir el informe a la correspondiente dependencia MET.

5.3.11 En los *Procedimientos para los servicios de navegación aérea — Gestión del tránsito aéreo* (Doc 4444, PANS-ATM), 6.4.1, 6.6 y 7.3.1.2.2, se trata la transmisión de aeronotificaciones de cizalladura del viento a otras aeronaves y el suministro de información sobre cizalladura del viento a los pilotos en general. La aeronotificación debería retransmitirse sin modificación alguna de su contenido, si bien debería añadirse la información objetiva pertinente suplementaria que falte en el informe original, si se conoce (p. ej., tipo de aeronave, pista). Los informes deberían transmitirse en el orden normal siguiente, cuyo contenido dependerá de los pormenores que contenga el informe original:



- a) Ecos en forma de gancho y de arco comúnmente observados durante ráfagas descendentes. Una configuración de onda de eco en línea (LEWP) a menudo comprende un eco en forma de arco que se mueve rápidamente. La reflectividad máxima dentro de un eco en forma de arco aparece frecuentemente a la izquierda del centro del arco.



- b) Una forma característica de los ecos radar relacionados con fuertes y extensas ráfagas descendentes. Algunos de los ecos en forma de arco se desintegran antes de convertirse en ecos en forma de coma. Durante el período de las ráfagas descendentes más fuertes, el eco toma frecuentemente la forma de punta de lanza o de rizo que apunta en la dirección del movimiento ("DB" indica la situación de la ráfaga).

Figura 5-13. Características de los ecos radar que producen ráfagas descendentes
(según Fujita, 1978, con adaptación por la OACI)

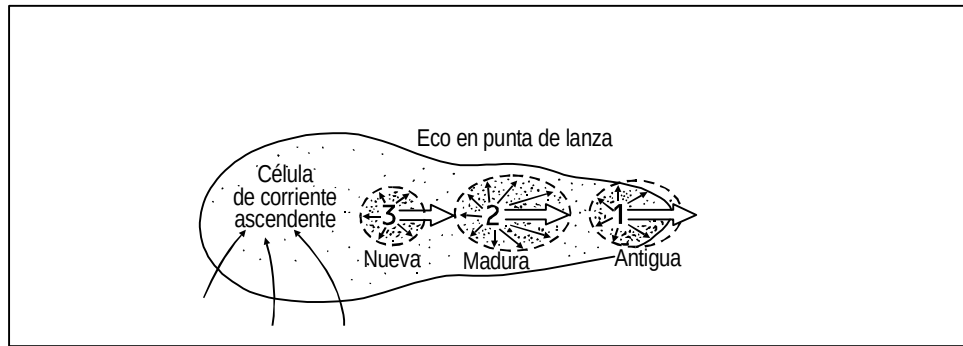


Figura 5-14. Vista en planta del modelo de Fujita-Byers de un eco en forma de punta de lanza
(según Fujita, 1976)

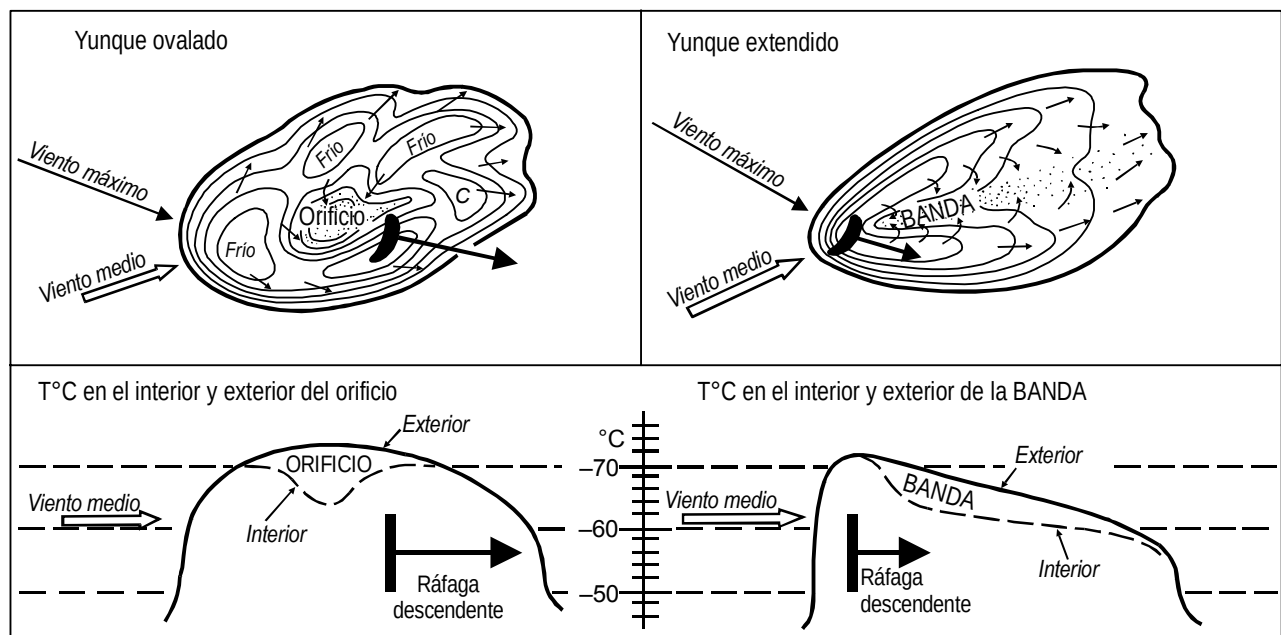


Figura 5-15. Diagramas esquemáticos de configuraciones y perfiles de la temperatura de la cima de las nubes (T_{BB}). Los vientos medios significan viento de la capa media de 0 a 3 km o de 3 a 6 km por debajo de la altura del viento máximo cerca del nivel del yunque. Basado en los análisis de imágenes infrarrojas correspondientes a cuatro casos de ráfagas descendentes.
(según Fujita, 1978, con adaptación por la OACI)

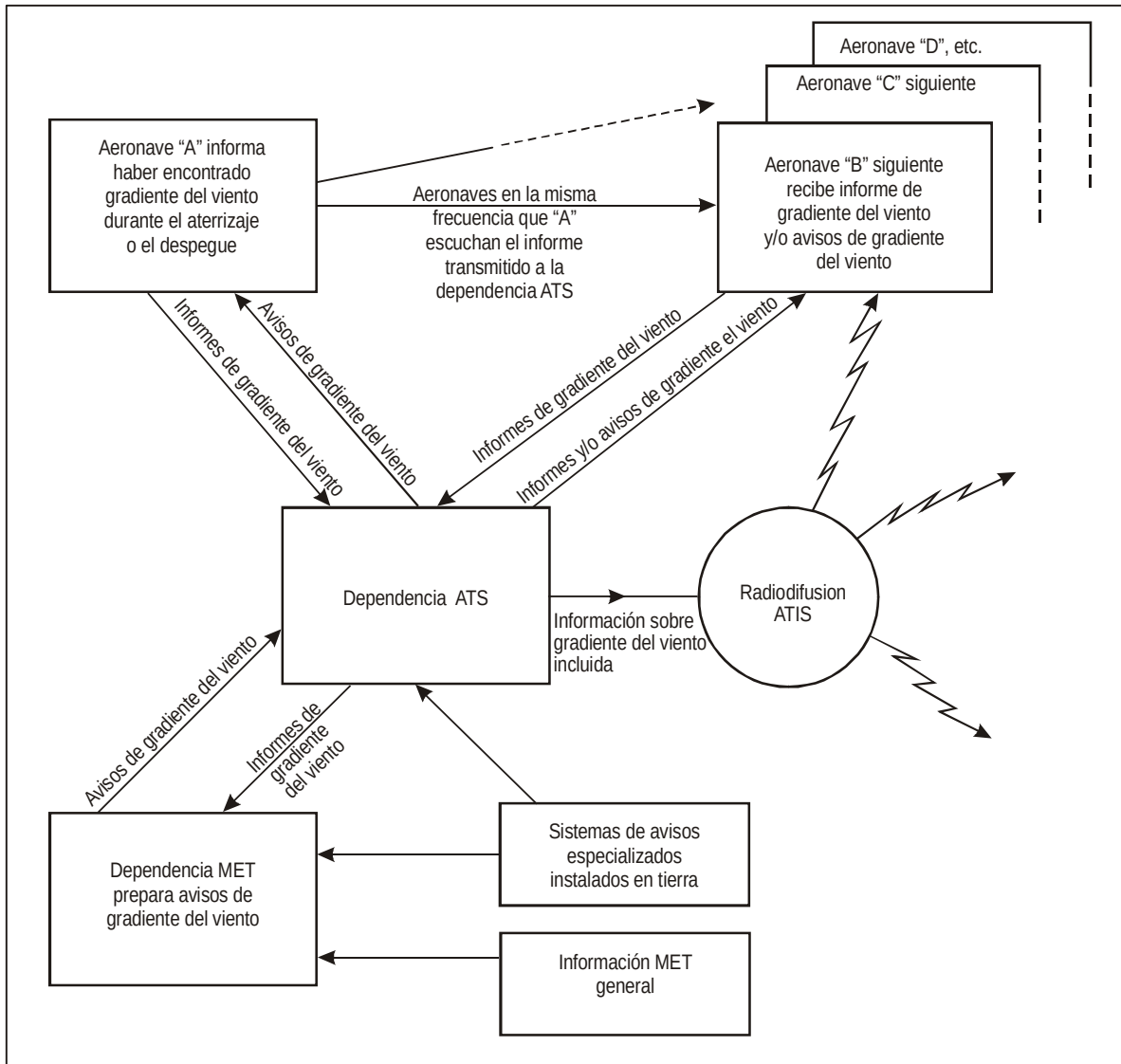


Figura 5-16. Transmisión de la información sobre cizalladura del viento entre MET, ATS y pilotos

- a) cizalladura del viento — identificador;
- b) tipo de aeronave — se añade si no figura en el informe original;
- c) descripción del suceso — ningún cambio en el informe recibido del piloto;
- d) altura del encuentro con cizalladura del viento — ningún cambio en el informe recibido del piloto;
- e) fase de vuelo — ningún cambio en el informe recibido del piloto;
- f) pista — se añade si no figura en el informe original;
- g) hora del encuentro — ningún cambio en el informe recibido del piloto; y
- h) información MET y operacional — ningún cambio en el informe recibido del piloto.

Se indica a continuación un ejemplo de un informe:

“CIZALLADURA DEL VIENTO B747 NOTIFICÓ FUERTE CIZALLADURA DEL VIENTO A 300 FT EN APROXIMACIÓN RWY27 A LAS 0937 EMPUJE MAX NECESARIO”.

5.3.12 En el Anexo 11, Capítulo 4, se trata de la inclusión en la radiodifusión ATIS de la información disponible sobre fenómenos MET significativos (o sea, incluida la cizalladura del viento) en las áreas de aproximación, despegue y ascenso.

5.3.13 En los PANS-ATM, 4.12.6, se trata la transmisión de aeronotificaciones de cizalladura del viento por las dependencias ATS a la oficina MET correspondiente. Dichos informes constituyen la base para los avisos de cizalladura del viento preparados por la oficina MET (véase 5.3.4).

5.3.14 En la exposición de requisitos operacionales en el Apéndice 1, 2.1 a), se menciona la necesidad de proporcionar a los pilotos información sobre cambios del viento en la superficie a lo largo de la pista. La cizalladura horizontal del viento a lo largo de la pista, que se manifiesta por un viento en la superficie muy variable o vientos en la superficie que difieren de manera significativa, según lo indicado por varios anemómetros, puede ser ocasionada por corrientes del viento en torno a edificios, frentes de masa de aire, frentes de brisa de mar, frentes de ráfagas y microrráfagas, etc., y puede causar dificultad para los pilotos en el momento de tomar contacto con el suelo y efectuar el recorrido en tierra, así como durante el recorrido de despegue (véase el Capítulo 4). En los aeródromos en que se presenta este problema, en el Anexo 3, Apéndice 3, 4.1.1.2, se recomienda que se instalen varios sensores. De conformidad con los PANS-ATM, la información sobre el viento en la superficie y sus cambios y variaciones importantes debería:

- a) transmitirla el servicio de control de aproximación a las aeronaves en la comunicación inicial y al comienzo de la aproximación final (Capítulo 6);
- b) transmitirla el control de aeródromo a las aeronaves antes de que entren en el circuito de tránsito (Capítulo 7);
- c) transmitirla el control de aeródromo a las aeronaves antes del rodaje y antes del despegue (Capítulo 7); y
- d) estar disponible en los centros de control de área apropiados o los centros de información de vuelo para transmitirla a las aeronaves supersónicas (Capítulo 9).

A este respecto, en el Anexo 3, las “diferencias” del viento en la superficie se refieren a un cambio del viento medio (es decir, determinado salto a un nuevo viento dominante) registrado ya sea en un anemómetro o entre varios, mientras que las “variaciones” del viento en la superficie se refieren a condiciones en las que dicho viento (dirección y velocidad) fluctúa en torno a algún valor medio, si bien el propio valor medio no varía. Figura a continuación un ejemplo de un informe en que se indica un cambio del viento medio en la superficie a lo largo de la pista:

“FASTAIR 345 AUTORIZADO A ATERRIZAR VIENTO EN LA ZONA DE TOMA DE CONTACTO 270° 7 NUDOS EXTREMO FINAL DE PISTA VIENTO 160° 15 NUDOS”.

Figura a continuación un ejemplo de un informe en que se indica una fluctuación del viento en la superficie:

“FASTAIR 345 AUTORIZADO A ATERRIZAR VIENTO 270 A 350° 20 NUDOS CON RÁFAGAS HASTA 10 A 30 NUDOS”.

5.3.15 En algunos aeródromos, particularmente en los Estados Unidos, se ha instalado un LLWAS (véanse 5.1.7 a 5.1.14). En estos casos, se han tomado disposiciones en la esfera local destinadas a que las dependencias ATS transmitan a las aeronaves alertas de cizalladura del viento obtenidas mediante este sistema. Cuando se detecta una cizalladura significativa [diferencia vectorial ≥ 30 km/h (15-kt)] entre un anemómetro periférico y el anemómetro en el centro del campo, suena una alerta y se presentan y

transmiten a las aeronaves los dos valores relativos al viento. La información relativa a la diferencia vectorial real no se transmite a las aeronaves. A continuación figuran ejemplos de dichos informes:

“CIZALLADURA DEL VIENTO (ALERTA) VIENTO CENTRO CAMPO 270° 20 NUDOS LÍMITE OESTE 180° 25 NUDOS”; o

“CIZALLADURA DEL VIENTO (ALERTA) TODOS LOS CUADRANTES VIENTO CENTRO CAMPO 210° 14 NUDOS LÍMITE OESTE VIENTO 140° 22 NUDOS”.

5.3.16 Las dependencias ATS deberían seguir transmitiendo información sobre las condiciones de cizalladura del viento hasta que se confirme, ya sea por informes posteriores de aeronaves o bien por los avisos de la oficina MET correspondiente, que dichas condiciones ya no son significativas para las operaciones en el aeródromo. En el Anexo 3, Capítulo 7, se trata de la cancelación de los avisos de cizalladura del viento por la oficina MET, lo que se analiza más en detalle en 5.3.23. La dependencia ATS debería continuar transmitiendo a las demás aeronaves interesadas las aeronotificaciones de cizalladura del viento hasta que la oficina MET correspondiente incluya dichos informes en un aviso de cizalladura del viento. Seguidamente, se transmitirá a todas las aeronaves interesadas el aviso de cizalladura del viento hasta que lo cancele la oficina MET.

5.3.17 En los aeródromos que cuenten con redes de anemómetros automatizados, TDWR u otros sistemas de teledetección, los avisos deberían transmitirse de conformidad con los ejemplos que figuran en el Anexo 3, Capítulo 7. En 5.1.20 se proporciona la base para dichos mensajes.

RESPONSABILIDAD DE LOS SERVICIOS MET PARA NOTIFICAR CIZALLADURA DEL VIENTO

5.3.18 La oficina MET designada para prestar servicio al aeródromo debería proporcionar a las dependencias ATS y a los explotadores, etc., información sobre cizalladura del viento a poca altura en un aeródromo, de la manera siguiente:

- a) en los avisos de cizalladura del viento (Anexo 3, Capítulo 7 y Apéndice 6, Tabla A6-3); y
- b) en la sección de información suplementaria de los informes MET ordinarios y especiales (Anexo 3, Capítulo 4).

5.3.19 Los avisos de cizalladura del viento pueden basarse en informes de aeronaves recibidos por conducto de una dependencia ATS (véase 5.3.13), observaciones directas mediante equipo MET convencional (p. ej., anemómetro), pronósticos de fenómenos MET que se sabe producen cizalladura del viento (p. ej., nubes de convección) y equipo terrestre de aviso de cizalladura del viento (p. ej., anemómetros instalados en torre). Los avisos deberían prepararse en lenguaje claro abreviado de conformidad con el modelo en el Anexo 3, Apéndice 6, Tabla A6-3, e identificarse como “WS WRNG”, por ejemplo:

“YUDO WS WRNG 01 211230 VALID 211245/211330 WS APCH RWY12 FCST SFC WIND 320/10 KT 60 M-WIND: 360/25 KT”

[o sea, suponiendo que se dispone de datos sobre vientos reales].

Cuando se utilice un informe de aeronave para preparar un aviso o confirmar un aviso expedido previamente, debería transmitirse sin modificaciones el informe de aeronave correspondiente, incluido el tipo de aeronave, por ejemplo:

“YUCC WS WRNG 02 201500 VALID TL 201545 MOD WS IN APCH REP AT 1455 B747 30 KT ASPEEDL 2 NM FNA RWY13”.

5.3.20 En lo que atañe a los avisos de cizalladura del viento basados en pronósticos de fenómenos MET pertinentes, resulta difícil mostrarse dogmático respecto a la forma de presentación preferida. En

general, no será posible suministrar pronósticos cuantitativos fiables sobre cizalladura del viento relacionada con los fenómenos, lo que significa que sólo pueden proporcionarse descripciones cualitativas. Habida cuenta de estas circunstancias, puede sentirse la tentación de incluir información que no sea estrictamente pertinente, lo que debería evitarse, y los avisos deberían siempre ser lo más concisos posible y de conformidad con el modelo que figura en el Anexo 3, Apéndice 6, Tabla A6-3. Debería indicarse claramente que se trata de un “pronóstico”, utilizando la abreviatura FCST.

5.3.21 Debe también considerarse la cuestión de la cizalladura del viento de origen convectivo y no convectivo y tal vez tengan que examinarse éstos por separado. Mientras es preciso que los pilotos y el personal ATS comprendan que, cuando se pronostican tormentas, éstas suelen ir acompañadas sistemáticamente de cizalladura del viento, así como de engelamiento, turbulencia, granizo, etc., sigue siendo necesario señalar a la atención condiciones especiales, p. ej., microrráfagas. En este caso, el aviso podría formularse de la manera siguiente:

“YUDO WS WRNG 231530 VALID 231600/231605 MBST CLIMBOUT RWY26 FCST”.

De poco serviría que una plétora de avisos de cizalladura del viento se expidiera cada día para cada tormenta aislada. Las autoridades competentes deben evaluar la situación en sus aeródromos y elaborar procedimientos locales en consecuencia.

5.3.22 En el caso de cizalladura del viento de origen no convectivo (p. ej., corriente en chorro a poca altura), es mucho mayor la posibilidad de pronosticar los fenómenos MET en cuestión. Se indica a continuación un ejemplo de un aviso de este tipo:

“YUDO WS WRNG 01 240600 VALID 240700/240900 WS IN APCH FCST SFC WIND: 270/10 KMH
600 M-WIND: 360/100 KMH”.

Cuando la cizalladura del viento no transitoria constituye una característica corriente de la climatología del aeródromo en condiciones MET conocidas y periódicas, tales como cizalladura del viento ocasionada por el terreno, deberían incluirse pormenores al respecto en la sección MET de los AIP de los Estados como información general útil para los pilotos; por su parte, los explotadores deberían incluirla en las guías de ruta apropiadas.

5.3.23 Con arreglo a lo dispuesto en el Anexo 3, Capítulo 7, deberían cancelarse los avisos de cizalladura del viento cuando los informes de aeronaves indiquen que ya no hay cizalladura del viento o después de un tiempo acordado, si no se reciben otros informes. Deberían fijarse localmente para cada aeródromo los criterios que regulan la cancelación de un aviso de cizalladura del viento, por acuerdo entre las autoridades MET y ATS y los explotadores interesados. A este respecto, es preciso tener en cuenta la mezcla de tráfico normal en el aeródromo para asegurarse de que, por ejemplo, los avisos de cizalladura del viento que se basan en informes de aeronaves ligeras no se cancelen demasiado pronto simplemente porque los informes ulteriores transmitidos por grandes aeronaves de reacción de transporte no hayan confirmado su existencia (es decir, tal vez porque la cizalladura del viento no sea de intensidad suficiente como para afectarlas). Nunca se insistirá demasiado en la importancia que reviste a este respecto una coordinación efectiva entre ATS, MET y explotadores. En el *Manual sobre coordinación entre los servicios de tránsito aéreo, Servicios de información aeronáutica y los Servicios de meteorología aeronáutica* (Doc 9377) se tratan estas cuestiones más en detalle.

5.3.24 Durante muchos años, la inclusión de información sobre cizalladura del viento en la sección de información suplementaria de los informes MET ordinarios y especiales, ha figurado como método recomendado en el Anexo 3, Capítulo 4. Por consiguiente, los observadores conocen bien el procedimiento y resulta innecesario dar aquí consejos al respecto. Sin embargo, cabe señalar que si se pone en práctica en un aeródromo la expedición de avisos de cizalladura del viento, sería preciso asegurarse de que las instrucciones y procedimientos, etc., destinados al personal local en lo tocante a “avisos” y los relativos a “inclusión de cizalladura del viento en la información suplementaria” sean compatibles y no se contradigan de modo alguno. Un problema que debería tenerse en cuenta, si se proyecta el procesamiento y la presentación automáticos de informes MET en los aeródromos, consiste en que debería preverse lo

necesario en los soportes lógicos de comunicaciones y de presentación para poder incluir al azar en los informes la información suplementaria de los informes de cizalladura del viento. Se indica a continuación un ejemplo de dicha información suplementaria en lenguaje claro abreviado:

“SPECIAL YUDO 151115 Z WIND 050/25 KT MAX 37 MNM 10 VIS 2500 M TSRA CLD BKN CB 500 FT T25/DP22 QNH 1008 HPA WS IN CLIMBOUT”.

PROGRAMA INTEGRADO DE LA FAA SOBRE CIZALLADURA DEL VIENTO (INFORMACIÓN TERMINAL)

5.3.25 Esta parte del programa trata de la elaboración de procedimientos relativos a la transmisión oportuna a los pilotos de información sobre cizalladura del viento en el entorno terminal. Abarca el uso de sistemas como radar meteorológico, LLWAS y TDWR (véanse 5.1.5, 5.1.7 a 5.1.14 y 5.1.19, respectivamente).

SISTEMA BÁSICO CARACTERÍSTICO DE AVISO DE CIZALLADURA DEL VIENTO

5.3.26 Puede servir para ilustrar lo que puede hacerse en la práctica ante el problema concreto⁷³ de cizalladura del viento no transitoria, un examen final del “sistema de aviso de cizalladura del viento” básico característico establecido en el aeropuerto de Helsinki-Vantaa en Finlandia. En el Apéndice 4 figura un ejemplo de un sistema más complejo para resolver el problema de la cizalladura del viento transitoria.

5.3.27 En Finlandia, en Escandinavia y en otras partes del mundo, la cizalladura del viento relacionada con inversiones de temperatura a poca altura es un fenómeno bastante corriente. Constituye una preocupación importante para las autoridades la posibilidad de pérdida de actuación de las aeronaves al aterrizar y despegar en estas condiciones debido al encuentro de temperaturas más elevadas que el gradiente vertical de temperatura normal, combinadas con componentes de viento de frente o de cola que cambian rápidamente. Con objeto de resolver este problema, se instalaron sensores de viento, temperatura y humedad a niveles seleccionados en un mástil de transmisión de televisión existente de 300 m (1 000 ft) a 20 km (12 NM) al suroeste del aeropuerto. Los datos de estos sensores se transmiten al aeropuerto y se analizan en tiempo real por computadora. Los datos sobre el viento obtenidos de este mástil se correlacionan con datos INS notificados por aeronaves durante el aterrizaje y el despegue y la correlación entre ambas series de datos fue de +0,85 respecto a la velocidad y +0,99 respecto a la dirección. Se expiden avisos de cizalladura del viento y de inversiones significativas $\geq 10^{\circ}\text{C}$ según el requisito provisional (Recomendación 3/5) formulado por la octava Conferencia de navegación aérea (Montreal, 1974)]. Los avisos se presentan en los puestos de televisión en circuito cerrado del aeródromo y contienen información sobre los vientos reales a determinados niveles seleccionados, así como la magnitud de la inversión, del modo siguiente:

“WS WRNG
WIND AT 700 FT 160/30 KT
WIND AT 300 FT 090/05 KT
INVERSION 12°C BELOW 900 FT”.

Un aviso de cizalladura del viento o inversión que esté vigente en cualquier momento se indica también como una observación que se adjunta al informe MET ordinario; se presenta también automáticamente en el sistema de televisión de circuito cerrado del aeródromo. El sistema de avisos se usa en forma ordinaria desde 1978 y se considera muy útil. En otros lugares funcionan sistemas semejantes, p. ej., en Dinamarca, Hong Kong (China), Suecia y la Federación de Rusia. En el caso de Hong Kong (China), los anemómetros fueron instalados en colinas, en lugares estratégicos a lo largo de la pendiente de aproximación.⁷⁴

— — — — —

Referencias

1. Zeltmann, 1985: The crash of C-GTLA, Preprints, *Second Conference on Aviation Weather Systems*, Montréal, Canada, American Meteorological Society.
2. Bell and Tsui, 1981: A low-level wind shear detection system, *Weather*, Royal Meteorological Society, London.
3. Kingswell, 1984: Observations of a quasi-circular squall line off north-west Australia, *Weather*, Royal Meteorological Society, London.
4. Goff, 1980: Low-level wind shear alert system (LLWSAS), United States Federal Aviation Administration, Report No. FAA-RD-80-45.
5. Wilson and Wesley, 1992: Specification: enhanced LLWAS III logarithms, M.I.T. Lincoln Laboratory.
6. Wilson and Cole, 1983: LLWAS II and LLWAS III Performance Evaluation, Preprints, *Fifth Conference on Aviation Weather Systems*, Vienna, VA, American Meteorological Society.
7. United States Federal Aviation Administration, 1989: Siting guidelines for LLWAS remote facilities, FAA Order 6560.21A.
8. Nilsen, Biagi and Law, 1999: Implementation status on the LLWAS relocation and sustainment programme (LLWAS-RS), Preprints, *Eighth Conference on Aviation, Range, and Aerospace Meteorology*, Dallas, TX, American Meteorological Society.
9. Fage and Huguet, 1985: Wind shear detection using Doppler acoustic sounder (SODAR), Preprints, *Second Conference on Aviation Weather Systems*, Montréal, Canada, American Meteorological Society.
10. Singal, Aggarwal and Gera, 1982: Studies of correlation between SODAR, observed stratified layer structures and wind shear, *Mausam*, Volume 33, Indian Meteorological Department.
11. Turesson and Dahlquist, 1985: Use of SODAR and mini-SODAR in aviation for wind shear warnings and short-term forecasting, *Third WMO Technical Conference on Instruments and Methods of Observation*, Ottawa, Canada.
12. Motallebi, 1982: Doppler radar observation of the evolution of downdrafts in convective cloud, NASA Atmospheric Sciences Paper No. 35.
13. Clift, 1985: Use of radar in meteorology, WMO Technical Note No. 181.
14. Mahoney and Biter, 1993: Wind shear detection: TDWR and LLWAS operational experience in Denver 1988–1992, Preprints, *Fifth Conference on Aviation Weather Systems*, Vienna, VA, American Meteorological Society.
15. Evans, 1991: Status of the terminal Doppler weather radar one year before deployment, Preprints, *Fourth Conference on Aviation Weather Systems*, Paris, France, American Meteorological Society.
16. Cornman and Mahoney, 1991: Integration of the TDWR and LLWAS wind shear detection systems, Preprints, *Fourth Conference on Aviation Weather Systems*, Paris, France, American Meteorological Society.
17. Isaminger, Boorman and Crowe, 1996: Discussion of the impact of data contamination on TDWR algorithm performance, *Workshop on Wind Shear and Wind Shear Alert Systems*, Oklahoma City.
18. Isaminger, Crowe and Proseus, 2000: ITWS and ITWS/LLWAS-NE alert performance at Dallas-Ft. Worth and Orlando, Preprints, *Ninth Conference on Aviation, Range, and Aerospace Meteorology*, Orlando, FLA, American Meteorological Society.
19. Fahey, Bernays, Biron and Cole, 2000: Distribution of aviation weather hazard information: low altitude wind shear, Preprints, *Ninth Conference on Aviation, Range, and Aerospace Meteorology*, Orlando, FLA, American Meteorological Society.

20. Evans and Wolfson, 2000: Extending the Integrated Terminal Weather System (ITWS) to address urgent terminal area weather needs, Preprints, *Ninth Conference on Aviation, Range, and Aerospace Meteorology*, Orlando, FLA, American Meteorological Society.
21. Cole and Todd, 1993: A comparative performance study of TDWR/LLWAS-3 integration algorithms for wind shear detection, Preprints, *Fifth Conference on Aviation Weather Systems*, Vienna, VA, American Meteorological Society.
22. Cole, 1992: TDWR/LLWAS Integration Algorithm Specification, Version 1.1, Report No. DOT/FAA/NR-92/3.
23. NCAR/RAP, 1993: Summary Project Report: The 1992 demonstration and evaluation of an integrated wind shear and gust front detection and warning system at Stapleton Airport.
24. Evans, 1991: Integrated Terminal Weather System (ITWS), Preprints, *Fourth Conference on Aviation Weather Systems*, Paris, France, American Meteorological Society.
25. Wolfson, Forman, Hollowell, and Moore, 1999: The growth and decay storm tracker, *79th Annual Conference of the American Meteorological Society*, Dallas, Texas.
26. Proseus and Isaminger, 1999: Optimizing the performance of the ITWS microburst detection algorithm in dry environments, Preprints, *Eighth Conference on Aviation, Range, and Aerospace Meteorology*, Dallas, TX, American Meteorological Society.
27. Wolfson, Delanoy, Liepins, Forman and Hollowell, 1983: The ITWS microburst prediction algorithm, Preprints, *Fifth Conference on Aviation Weather Systems*, Vienna, VA, American Meteorological Society.
28. United States Aviation Administration, 1998: ITWS gust front products, *Description of ITWS Weather Products*, MIT/Lincoln Laboratory, FAA Aviation Technology Seminar.
29. Greeves, 1998: Unique wind shear and turbulence warning system enters operation at Hong Kong's new airport, *ICAO Journal*.
30. Nierow, Showalter and Souders, 1999: — The role of ITWS in the modernization of the national airspace system, Preprints, *Eighth Conference on Aviation, Range, and Aerospace Meteorology*, Dallas, TX, American Meteorological Society.
31. Koepp, Schwiesow and Werner, 1984: Remote measurements of boundary layer wind using CW Doppler LIDAR, *Journal of Climate and Applied Meteorology*, American Meteorological Society.
32. Little, 1982: Ground-based remote sensing for meteorological nowcasting, *Nowcasting*, Academic Press Inc. (London) Ltd.
33. United States Federal Aviation Administration, Airworthiness criteria for the approval of airborne wind shear warning systems in transport category airplanes, FAA Advisory Circular AC 25-12, 11 February 1987, and Criteria for the operational approval of airborne wind shear alerting and flight guidance systems, FAA Advisory Circular AC 120-41, 11 July 1983.
34. Bowles, 1990: Reducing wind shear risk through airborne systems technology, 17th Congress of the ICAS, Stockholm, Sweden and, same author, Windshear detection and avoidance — airborne systems survey, 29th IEEE Conference on Decision Control.
35. Lewis, Robinson, Hinton and Bowles, 1994: The relationship of an integral wind shear hazard to aircraft performance limitations, NASA TM — 109080.
36. Proctor and Hinton, 2000: A wind shear hazard index, Preprints, *Ninth Conference on Aviation, Range, and Aerospace Meteorology*, Orlando, FLA, American Meteorological Society.
37. United States Federal Aviation Administration, 1995: Airborne short and long range wind shear predictive systems (forward-looking wind shear systems) — general certification methodology and system level requirements.

38. Vickroy, Bowles and Schlickemaier, 1991: Airborne wind shear detection and warning systems, *Third Combined Manufacturers' and Technologists' Conference*, Hampton, VA, NASA Publication 10060, Part 2:DOT/FAA/RD-91/2-II.
39. Staton, 1984: Airborne Doppler radar for wind shear detection, *Workshop on Wind Shear/Turbulence Inputs to Flight Simulation and Systems Certification*, Hampton, VA.
40. Bracalante, et al., 1988: Airborne Doppler detection of low altitude wind shear, *AIAA/NASA/AFWAL Sensors and Measurement Technologies Conference*, Atlanta, Georgia, AIAA-88-4657.
41. Woodfield, 1983: Wind shear and wake vortex research in the United Kingdom (1982), NASA Report CP-2274.
42. Doviak, et al., 1986: Analysis of airborne Doppler LIDAR, Doppler radar and tall tower measurements of atmospheric flows in quiescent and stormy weather, NASA Contractor Report No. 3960.
43. Emmitt, 1985: Convective storm downdraft outflows detected by NASA/MSFC airborne 10.6 NM pulsed Doppler LIDAR system, NASA Contractor Report No. 3898.
44. Frehlich, Hannon, and Henderson, 1998: Coherent Doppler LIDAR measurements of wind field statistics, *Boundary Layer Meteorology*, Volume 86. Also by the same authors, Performance of a 2 μ coherent Doppler LIDAR for wind measurements, *Journal of Atmospheric Oceanic Technology*, Volume 11, 1994.
45. Huffaker and Hardesty — Remote Sensing of Atmospheric Wind Velocities Using Solid State and Coherent Laser Systems, *Proceedings IEEE*, Volume 84, No. 2, 1996.
46. Soreide, Bogue, Ehernberger, Hannon and Bowdle, 2000: Airborne coherent LIDAR for advanced in-flight measurements (ACLAIM) flight testing of the LIDAR sensor, Preprints, *Ninth Conference on Aviation, Range, and Aerospace Meteorology*, Orlando, FLA, American Meteorological Society.
47. Steenblik, 1984: The caret, the worm and the flat-footed duck, *Airline Pilot Magazine*.
48. Schlickemaier, 1984: Case history of FAA/SRI wind shear models, *Proceedings of Workshop on Wind Shear/Turbulence Inputs to Flight Simulation and Systems Certification*, Hampton, VA.
49. Badner, 1979: Low-level wind shear: A critical review, NOAA Technical Memorandum NWS FCST-231.
50. Woodfield and Woods, 1984: World-wide experience of wind shear during 1981–82, Advisory Group for Aerospace Research and Development (AGARD), Conference Proceedings No. 347.
51. Swolinsky, 1986: Wind shear models for aircraft hazard investigation, *2nd International Symposium on Aviation Safety*, Toulouse, France.
52. United States Federal Aviation Administration Advisory Circular AC-120-41, 11 July 1983: Criteria for approval of airborne wind shear alerting and flight guidance systems.
53. TSO-C117, Airborne wind shear warning and escape guidance systems for transport airplanes, FAA Aircraft Certification Service, 24 July 1990.
54. Richwien and Mcleod, 1978: Low level frontal wind shear forecast test, FAA Report No. FAA-RD-77-184.
55. Brook, 1970: Preliminary study of wind shear in the boundary layer at Melbourne Airport, Meteorological Study No. 19, Australian Bureau of Meteorology.
56. Fox, 1979: Climate of Seychelles, Seychelles Government Publications, Directorate of Civil Aviation, Seychelles.
57. Zipser and Bedard, 1982: Front range wind storms revisited, *Weatherwise*, United States.
58. Smith, 1985: On severe downslope winds, *Journal of the Atmospheric Sciences*.

59. Harrison, 1965: The mountain wave, NASA Report No. CR-315.
 60. Hopkins, 1977: Forecasting techniques of clear air turbulence including that associated with mountain waves, WMO Technical Note No. 155.
 61. Nicholls, 1973: The airflow over mountains, WMO Technical Note No. 127.
 62. Dawe, 1982: A study of the katabatic wind at Bruggen on 27 February 1975, *Meteorological Magazine*, London.
 63. André and Mahot, 1982: The nocturnal surface inversion and influence of radiative cooling, *Journal of the Atmospheric Sciences*.
 64. Abele, 1982: Diurnal variability of wind velocity increase with height, Los Alamos National Laboratory Research Paper No. LA-9601-MS.
 65. Browning (Ed), 1982: *Nowcasting*, Academic Press Inc. (London) Ltd.
 66. World Meteorological Organization, 1983: Report of the Eighth Session of the WMO Commission for Basic Systems, Geneva.
 67. Smith, Wade and Woolf, 1985: Combined atmospheric sounding/cloud imagery: A new forecasting tool, *Bulletin of the American Meteorological Society*.
 68. George, 1960: *Weather forecasting for aeronautics*, Academic Press, New York.
 69. Bond, Browning and Collier, 1981: Estimates of surface gust speeds using radar observations of showers, *Meteorological Magazine*, London.
 70. Fujita, 1978: Manual of downburst identification for Project NIMROD, SMRP Research Paper No. 156, University of Chicago.
 71. Fujita, 1976: Spearhead echo and downburst near the approach end of a JFK Airport runway, New York City, University of Chicago, SMRP Research Paper No. 137.
 72. Woodfield and Woods, 1981: Wind shear from head wind measurements on British Airways B747-236 aircraft, Royal Aircraft Establishment Technical Memorandum No. FS409.
 73. Korhonen, 1981: An operational wind shear and inversion warning system for Helsinki-Vantaa Airport, Finnish Meteorological Institute Research Papers.
 74. Klemp and Weisman, 1983: The dependence of convective precipitation patterns on vertical wind shear, Preprints, *21st Conference on Radar Meteorology*, Edmonton, Canada, American Meteorological Society.
-

Capítulo 6

INSTRUCCIÓN

6.1 GENERALIDADES

6.1.1 Si bien la cizalladura del viento no es un fenómeno meteorológico (MET) nuevo y no constituye verdaderamente el único riesgo MET posible para la aviación, existen al menos dos motivos por los que se le atribuye tanta importancia. Primero, durante los últimos años se ha tenido un mayor conocimiento de sus efectos peligrosos en la actuación de los aviones al ser cada vez mayor el número de grandes aviones de transporte de reacción y al haber ocurrido una serie de accidentes mortales en los años setenta y ochenta. Segundo, en todos los medios aeronáuticos todavía parece que reina la confusión y la incompreensión respecto a las causas de la cizalladura del viento, lo que es exactamente este fenómeno y cuáles son sus efectos. Esto pudiera ser debido en parte a la complejidad innegable del tema y a las incertidumbres que lo rodean y, en parte, a la naturaleza efímera de la propia cizalladura del viento. En realidad, el éxito del desarrollo en los años noventa de sistemas eficaces de aviso de cizalladura del viento terrestres y de a bordo permitió inclinar la balanza a favor del piloto. Sin embargo, ningún sistema puede ser totalmente a prueba de fallas y, en cualquier caso, pocos Estados tienen los recursos para instalar y mantener equipo terrestre perfeccionado de aviso de cizalladura del viento, como el TDWR. Sea cual fuere el equipo con el que se cuente, para sobrevivir a un encuentro con fuerte cizalladura del viento se necesitan siempre reacciones rápidas y aptitudes por parte del piloto. La dificultad más importante con que se enfrentan el piloto y el meteorólogo es la de pronosticar con precisión la presencia de cizalladura del viento a poca altura. A ello se añade que aun cuando se haya pronosticado cizalladura del viento y se manifieste verdaderamente en determinada zona, una aeronave que vuele en dicha área tal vez no la encuentre debido a sus efectos localizados y transitorios. Por ello es tan importante notificar un encuentro con cizalladura del viento (véase 6.8). La instrucción constituye la única forma de contrarrestar esta confusión e incompreensión y proporcionar al piloto una base para ejercer un sano juicio y reaccionar rápidamente en un encuentro por inadvertencia con cizalladura del viento.

6.1.2 Es imposible insistir demasiado en la necesidad de elaborar un programa de instrucción que tenga por objeto asegurarse de que todas las personas que intervienen en las operaciones de aeronaves sean conscientes de los efectos peligrosos, incluso potencialmente mortales, de la cizalladura del viento a poca altura. El programa para la tripulación de vuelo debe empezar en las primeras etapas de su instrucción y proseguirse durante toda su carrera. Deben preverse cursos de instrucción periódica que tengan como finalidad principal mejorar la comprensión de los métodos para reconocer y evitar este fenómeno y tomar las medidas preventivas necesarias para contrarrestar sus efectos, especialmente en relación con los progresos técnicos actuales. Los requisitos relativos a instrucción se aplican tanto a los pilotos como a los mecánicos de a bordo. Además, los encargados de operaciones de vuelo (despachadores) y los controladores de tránsito aéreo (ATCO) y sus ayudantes necesitan instrucción sobre los riesgos de este fenómeno y la manera de reconocerlo. Los meteorólogos deben recibir su propia instrucción especializada para pronosticar cizalladura del viento, particularmente respecto a sus efectos en las operaciones de las aeronaves. Por último, es esencial que el personal auxiliar de a bordo conozca los riesgos que supone la cizalladura del viento.

6.1.3 Aunque es preciso estudiar algunos aspectos del tema más o menos a fondo, basándose en la especialidad de cada individuo y el grado y objeto de la instrucción debe adaptarse a sus cometidos; todo el personal dedicado a las operaciones debe poseer un conocimiento apropiado de la cizalladura del viento a poca altura, las condiciones en que puede producirse y la posible gravedad de sus efectos en los vuelos.

6.1.4 El Apéndice 1 contiene una exposición de requisitos operacionales, en cuyo párrafo 4, referente a la instrucción, se expone la necesidad de capacitar a los pilotos para contrarrestar los efectos de la cizalladura del viento a poca altura. Debido a que parte de la instrucción es esencialmente de tipo selectivo, los constructores de aeronaves tienen que proporcionar la mayor cantidad posible de la información necesaria, ampliada y adaptada según las necesidades, para que armonice con sus procedimientos operacionales y métodos de instrucción.

6.2 OBJETIVOS DE LA INSTRUCCIÓN DE LA TRIPULACIÓN DE VUELO

6.2.1 Los pilotos y los mecánicos de a bordo deberían seguir el mismo programa de instrucción. Es esencial que los ejercicios con simulador de vuelo se lleven a cabo con una tripulación de puesto de pilotaje completa para que todos sus miembros adquieran la capacidad de reconocer un encuentro con cizalladura del viento y comprender bien las medidas simultáneas que la tripulación debe tomar. La capacidad de reconocer tal encuentro y tomar las medidas necesarias dependerá en gran medida del equipo de a bordo y la intensidad del fenómeno.

6.2.2 Los objetivos mínimos de todo programa de instrucción de la tripulación de vuelo deberían ser:

- a) adquirir conocimientos de la dinámica de la cizalladura del viento y sus efectos en la actuación de la aeronave;
- b) proporcionar orientación para facilitar la identificación de las condiciones en que puede producirse cizalladura del viento;
- c) adquirir la capacidad de reconocer oportunamente un encuentro con cizalladura del viento; y
- d) adquirir la capacidad de ejecutar las maniobras de vuelo, posiblemente extremas, que puedan ser necesarias en el caso de encontrarse con cizalladura del viento.

6.2.3 De estos cuatro objetivos, los dos primeros pertenecen esencialmente a la instrucción en tierra, mientras que para los dos últimos es preciso disponer de un simulador de vuelo para que pueda proporcionarse una instrucción eficaz.

6.3 INSTRUCCIÓN EN TIERRA PARA LA TRIPULACIÓN DE VUELO

6.3.1 La instrucción en tierra destinada al otorgamiento inicial de la licencia de piloto privado y la de piloto comercial debería concentrarse en una introducción a los riesgos que presenta la cizalladura del viento y abarcar los objetivos a) y b) del programa de instrucción, descritos en 6.2.2.

6.3.2 El *Manual de instrucción*, Parte F-1 — *Meteorología para controladores de tránsito aéreo y pilotos* (Doc 7192) contiene detalles sobre la instrucción relacionada con la cizalladura del viento para la licencia de piloto comercial. En el Apéndice 9 se reproducen pasajes pertinentes de dicho manual.

6.3.3 La FAA publicó en 1987 un excelente documento titulado *Wind Shear Training Aid*,¹ en el que se explican detalladamente los efectos de la cizalladura del viento en las operaciones de vuelo junto con una amplia documentación al respecto.

6.3.4 Según se ha explicado en el Capítulo 4, las dimensiones y la masa de una aeronave son factores importantes que determinan la medida en que la cizalladura del viento afectará la actuación de determinado tipo de aeronave. Por consiguiente, debe prestarse atención especial a la instrucción sobre

aeronaves de grandes dimensiones respecto a las cuales los pilotos deben ser titulares de una habilitación de tipo. Así, además de una ampliación de la instrucción dada para satisfacer los dos primeros objetivos, en la instrucción en tierra relativa a determinado tipo de aeronave proporcionada por los explotadores a las tripulaciones de vuelo DEBEN tenerse en cuenta las características especiales de dicho tipo de aeronave, incluso los pormenores de cualquier equipo de detección de cizalladura del viento que pueda llevarse a bordo. Esta instrucción debería también guardar relación con la climatología de la zona geográfica en que tendrá que operar la tripulación de vuelo, especialmente si en dicha zona existe un mayor riesgo de cizalladura del viento. Se debería insistir en los puntos siguientes:

- a) para prevenir una catástrofe, es preciso evitar un encuentro con cizalladura del viento;
- b) un encuentro real con una cizalladura del viento puede ser reconocido en vuelo en una etapa muy avanzada para que el piloto pueda tomar las medidas necesarias; y
- c) cuando se disponga a bordo de equipo especial, es de importancia capital que se tomen medidas en el mismo momento en que se reciba un aviso y se sigan la orientación y los procedimientos elaborados por el explotador.

Es preciso destacar que esta instrucción en tierra debe darse a todos los pilotos que soliciten habilitaciones de tipo para aeronaves de grandes dimensiones, sea cual fuere la categoría de la licencia de piloto de que sea titular el solicitante.

6.3.5 Existen varias ayudas audiovisuales de que pueden disponer los Estados y los explotadores para ayudarles a elaborar sus programas de instrucción relacionados con la cizalladura del viento (véase el Apéndice 10).

6.4 INSTRUCCIÓN EN VUELO Y EN SIMULADOR

6.4.1 El programa de instrucción de las tripulaciones de vuelo debe también abarcar la manera de reconocer en vuelo la presencia de cizalladura del viento, así como los procedimientos y las maniobras que han de efectuarse en caso de tal encuentro.

6.4.2 Constituye un importante obstáculo en lo tocante a la eficacia de la instrucción en vuelo el hecho de que las maniobras que se suelen reconocer como las más apropiadas son, de por sí, demasiado peligrosas para efectuarlas en vuelo. Estas maniobras se hallarán en los límites de las posibilidades de actuación de la aeronave y será escaso o ninguno el margen de error de pilotaje. Además, el recurso a regímenes de motor que sean superiores a los límites normales del motor no pueden tolerarse salvo en el caso de verdaderas situaciones de emergencia. Estos factores, combinados con el hecho de que un encuentro con cizalladura del viento es afortunadamente un suceso raro, hacen que sea prácticamente imposible proporcionar instrucción en vuelo en condiciones que se ajusten a la realidad. Incluso si los posibles riesgos debidos a maniobras incorrectas pudieran reducirse de algún modo, seguiría siendo imposible reproducir a petición las diversas condiciones de cizalladura del viento. Por consiguiente, resulta claro que no es posible la instrucción en vuelo acerca de cómo se debe reaccionar ante la cizalladura del viento a poca altura y que es esencial disponer de un simulador de vuelo apropiado para la instrucción eficaz de las tripulaciones de vuelo. Otro factor que debería tenerse en cuenta es que los métodos de vuelo recomendados para el restablecimiento a raíz de un encuentro con cizalladura del viento son contrarios a la intuición, dado que se prevé que el piloto aumente la actitud de cabeceo de la aeronave, de ser necesario hasta 15° (teniendo en cuenta al mismo tiempo el sacudidor de palanca), aunque la velocidad relativa puede haber disminuido rápidamente. Además, el piloto no puede darse cuenta de que el ángulo de ataque tal vez haya también disminuido debido las fuertes corrientes descendientes verticales. Sólo una instrucción regular con un simulador puede crear la reacción instintiva necesaria en el piloto para que aplique inmediatamente los métodos de restablecimiento y con la confianza de que estas son las mejores maneras de utilizar al máximo la energía disponible para la aeronave en caso de encuentro con cizalladura del viento.

Debido a que la instrucción en simulador no suele ser accesible a los tripulantes de vuelo que no pertenecen a empresas de transporte aéreo, ello es razón de más para que sean capaces de reconocer la presencia posible de cizalladura del viento y traten de evitarla por todos los medios.

6.4.3 Es esencial que los constructores de aeronaves y los explotadores colaboren para elaborar técnicas y procedimientos apropiados para determinados tipos de aeronaves y equipo de a bordo disponible y que estos procedimientos se expongan detalladamente en el manual de operaciones del explotador. El programa de instrucción en vuelo debe concebirse de modo que garantice que los pilotos aprendan las diversas técnicas elaboradas y recomendadas por los constructores y explotadores para reconocer la cizalladura del viento, contrarrestar sus efectos y mantener o recuperar el dominio de la aeronave. Cuando sea posible, la instrucción debería llevarse a cabo en un simulador de tipo que cuente con el soporte lógico necesario para reproducir modelos de cizalladura del viento que se ajusten a la realidad. Los fabricantes de simuladores tienen fácil acceso a modelos tridimensionales realistas de cizalladura del viento de convección (ráfagas descendentes o microrráfagas), elaborados basándose en la reconstitución de los datos de accidentes y en modelos de campos de viento. Los explotadores deben asegurarse de que dichos modelos figuren en las especificaciones de todo sistema de simulación que instalen. Por consiguiente, no hay razón para que los pilotos de aeronaves de transporte a reacción no reciban instrucción regular con un simulador que incluya encuentros con estos peligrosos fenómenos. En el *Manual de criterios para calificar los simuladores de vuelo* (Doc 9625) figura amplia información y textos de orientación relacionados con los requisitos en materia de simulación, la validación y los ensayos de las funciones en un encuentro con cizalladura del viento.

6.4.4 La Federal Aviation Administration (FAA), en su plan de simulación perfeccionado, ha facilitado directrices en lo tocante a los métodos que han de seguirse para la instrucción de las tripulaciones de vuelo en simuladores de aeronaves perfeccionados (véase Federal Air Regulations, Parte 121, Apéndice 10). Este plan comprende tres fases; en la fase II se prescribe que los modelos de simulador incluyan “la dinámica representativa del viento de costado y de la cizalladura del viento en tres dimensiones basada en los datos relacionados con el avión”. Dichos modelos permiten reproducir las condiciones sumamente variables del viento de frente, viento de costado y corriente descendente que se encuentran en ráfagas descendentes/microrráfagas que acompañan a las tormentas, tanto dentro como fuera de la trayectoria nominal de vuelo.^{2,3} Según se ha indicado en el Capítulo 4, es esencial la introducción de la componente vertical (corriente descendente) en el modelo a fin de que la tripulación de vuelo pueda practicar en condiciones en las que el ángulo de ataque ya no corresponde a la actitud en cabeceo/velocidad aerodinámica, situación en la que por lo general carecen de experiencia. En la Circular de asesoramiento (AC) 120-41, de los Estados Unidos, titulada *Criteria for Operational Approval of Airborne Wind Shear Alerting and Flight Guidance Systems*, figuran perfiles representativos del viento (véase 5.2.12).

6.4.5 Numerosos explotadores ofrecen instrucción en simuladores en los cuales utilizan modelos completos de cizalladura del viento en tres dimensiones en los que los puntos de datos del viento se especifican en una serie de perfiles y de trayectorias de vuelo que pueden seguirse durante las maniobras de la aeronave y en las reacciones a las diversas maniobras de restablecimiento efectuadas por el piloto. Uno de estos sistemas de instrucción comprende un modelo tridimensional de una microrráfaga obtenido de los datos JAWS que puede programarse de modo que el centro de la microdescendente quede situado a lo largo o fuera de la trayectoria de vuelo (véase 3.5.16). Este modelo particular fue construido por el RAE del Reino Unido; en la Figura 3-16 a) se ilustra el modelo de microrráfaga utilizado.^{4,5} Otro sistema simula las tres componentes del viento en el espacio y el tiempo, turbulencia, temperatura, presión, precipitación (intensidad variable) y visibilidad y, para que sea más cabal el realismo, las correlaciona con los indicios visuales y sonoros y la salida de datos característica del radar meteorológico que de a bordo.⁶

6.4.6 Los procedimientos de operación que se recomiendan en caso de cizalladura del viento figuran normalmente en los manuales técnicos de operaciones proporcionados por los constructores para cada tipo de aeronave, así como en los manuales de operaciones de los explotadores. Existen otras fuentes de información, tales como las circulares de asesoramiento [p. ej., la Circular consultiva AC 00-54 (1988) de la

FAA, párrafo 7] publicadas por las administraciones nacionales. Los procedimientos recomendados por los constructores se examinan en el Capítulo 4 y, a manera de ejemplo, los procedimientos suplementarios aplicables en caso de condiciones meteorológicas desfavorables recomendados para el B737, figuran en el Apéndice 11. Si bien todos los procedimientos están basados en los mismos principios aerodinámicos, en cierta medida, cada combinación de tipo de aeronave/motor reacciona de modo distinto a la cizalladura del viento y, según sean los programas de cada explotador respecto a equipo, en el puesto de pilotaje puede haber instrumentos y equipo diferentes.

6.5 PROGRAMA INTEGRADO DE INSTRUCCIÓN SOBRE CIZALLADURA DEL VIENTO DE LA FAA

Fue objeto de preocupación para la industria aeronáutica el hecho de que la existencia de muchos programas diferentes de instrucción sobre cizalladura del viento pudiera resultar contraproducente y contribuir a sembrar la confusión entre el personal de operaciones. Como ya se ha indicado, el programa de instrucción de la FAA apareció en 1987; con el concurso de constructores y explotadores de aeronaves, su objetivo fue la elaboración de una “ayuda destinada a la instrucción sobre cizalladura del viento” definitiva que incluiría documentos distribuidos a los pilotos, un ejemplo de programa de instrucción sobre cizalladura del viento y un examen general de gestión, todos basados en datos corroborados y debidamente documentados. Además de las publicaciones, se prestó considerable atención a la producción de ayudas para la instrucción en vídeo.

6.6 INSTRUCCIÓN DEL PERSONAL DE CONTROL DE TRÁNSITO AÉREO

6.6.1 El controlador de tránsito aéreo (ATCO) es normalmente el enlace de comunicación vital entre el meteorólogo y el piloto, así como entre los pilotos, para la notificación de cizalladura del viento. Para ello, es esencial que se prevea un programa de instrucción para todos los controladores. Debería insistirse principalmente en la necesidad de que reciban instrucción los controladores empleados en los servicios de control de aproximación y de aeródromo, puesto que el despegue, la aproximación y el aterrizaje son las fases más críticas de vuelo en caso de encuentro con cizalladura del viento a poca altura.

6.6.2 El *Manual de instrucción*, Parte F-1 — *Meteorología para controladores de tránsito aéreo y pilotos* (Doc 7192) asiste en la elaboración de un programa de instrucción apropiado para los ATCO. En particular, comprende en 3.4 (Relación entre la presión y el viento) el conocimiento necesario de la definición de cizalladura del viento. En 3.10.2 se requiere también el estudio de la cizalladura del viento asociada con las tormentas (incluidos los frentes de ráfagas y las microrráfagas secas y húmedas) y los efectos de este fenómeno en las operaciones de aeronave. El nivel recomendado de conocimiento necesario se describe como “... conocimientos del tema y la capacidad, de ser aplicable, de ponerlos en práctica, con la ayuda de los textos de referencia e instrucciones”.

6.6.3 Los objetivos del programa de instrucción sobre cizalladura del viento destinado a los ATC deberían ser:

- a) proporcionar una comprensión de la cizalladura del viento y sus probables efectos en la actuación de la aeronave;
- b) ayudarles a reconocer las condiciones en que puede producirse cizalladura del viento; y
- c) adquirir un conocimiento de los procedimientos de notificación de cizalladura del viento y puesta en práctica de estos procedimientos (véase 6.8).

6.6.4 Los incisos a) y b) del párrafo 6.6.3 abarcan casi las mismas cuestiones que las del programa de instrucción en tierra para las tripulaciones de vuelo en 6.3. Así, el material disponible para las

tripulaciones de vuelo es también útil para la instrucción de los ATCO. Además, sería conveniente dar la oportunidad a los controladores, cuando sea posible, para que asistan en calidad de observadores a las clases de instrucción de los pilotos con simulador de vuelo, cuando se examinen los procedimientos relativos a cizalladura del viento.

6.7 INSTRUCCIÓN PARA METEORÓLOGOS

6.7.1 En virtud del *modus vivendi* concertado entre la OACI y la OMM, “si bien la OMM determinará los conocimientos meteorológicos que debe poseer el personal meteorológico dedicado al suministro de servicios meteorológicos para la navegación aérea internacional, la determinación de los conocimientos que este personal debe poseer, aparte de los meteorológicos, sobre lo aeronáutico, será de incumbencia de la OACI, lo que comunicará a la OMM mediante recomendaciones” (véase el Doc 7475). Habida cuenta del mencionado *modus vivendi*, se han elaborado directrices para la instrucción y capacitación del personal en la esfera de la meteorología aeronáutica, que se han publicado en WMO-No. 258, Capítulos 2 y 4, y WMO/TD No. 1101, Capítulo 3.3.

6.7.2 En las mencionadas publicaciones de instrucción de la OMM, se indican detalladamente los programas de estudios recomendados para la especialización en meteorología aeronáutica para meteorólogos BIP-M1 y técnicos meteorológicos BIP-MT. Los programas de estudios para meteorólogo BIP-M1 respecto al conocimiento MET aeronáutico contienen referencia concreta a cizalladura del viento, tanto no convectiva como de convección (tormentas), y su efecto en la aeronave en las fases de aproximación y aterrizaje. En lo que atañe a la meteorología aeronáutica, el nivel o norma de la instrucción debería ser el mismo que para las licencias de piloto. La instrucción para meteorólogos BIP-M1 abarcaría también amplia instrucción sobre pronósticos generales, incluidos los pronósticos de fenómenos concretos que se sabe producen cizalladura del viento a poca altura (corrientes en chorro a poca altura, inversiones de temperatura, brisas de tierra y mar, frentes de masas de aire, tormentas, especialmente las fuertes, etc.). La instrucción debería también comprender aspectos operacionales como la codificación y decodificación de los avisos de cizalladura del viento y su difusión.

6.7.3 Para los técnicos MET BIP-MT, el conocimiento MET aeronáutico recomendado es menos que para el meteorólogo BIP-M1, y en el programa de estudios recomendado para especialización sólo se mencionan las regiones de cizalladura del viento en el Capítulo 4.3 de WMO-Núm. 258. No obstante, se recomienda que se incluya información general sobre cizalladura del viento y los fenómenos que la producen en 4.2 d) movimiento atmosférico; corriente geotrópica, en la publicación de instrucción de la OMM.⁷

6.7.4 La OMM publica también una recopilación de notas de conferencia para la instrucción de todas las clases de meteorólogos en WMO-Núm. 364, Volumen II. La Parte 2 de dicha publicación está dedicada a la meteorología aeronáutica para meteorólogos y técnicos MET. En los lugares apropiados de dicha publicación se examina la cizalladura del viento a poca altura.

6.8 INSTRUCCIÓN SOBRE NOTIFICACIÓN DE CIZALLADURA DEL VIENTO

Dado que se ha desarrollado con éxito equipo operacional de teledetección de cizalladura del viento, el adelanto más importante que puede lograrse para resolver dicho problema consiste en que los Estados apliquen terminología y procedimientos de notificación de cizalladura del viento que sean normalizados. La introducción en los programas de instrucción pertinentes de procedimientos y terminología de notificación que se basen en los que figuran en el presente manual sería un paso importante hacia la normalización a escala mundial, incluidos los formatos de notificación tanto para los aeródromos que cuentan con sistemas TDWR o LLWAS como aquéllos que carecen de ellos, pero que son afectados por cizalladura del viento.

6.9 RESUMEN

6.9.1 La cizalladura del viento siempre ha existido, aunque no siempre nos hemos dado cuenta de ella. A raíz de varios accidentes de aviación mortales, se ha adquirido mayor conocimiento de sus características potencialmente mortales. Al mismo tiempo, ha aumentado nuestro conocimiento de sus efectos y han mejorado los medios a nuestro alcance para pronosticarla y enfrentarla. La instrucción tiene suma importancia para la seguridad de vuelo; es esencial para todos los explotadores un programa de instrucción efectivo sobre todos los aspectos de la cizalladura del viento. Debe siempre tenerse en cuenta que, debido a la naturaleza intrínsecamente caprichosa de la cizalladura del viento, en la instrucción debe insistirse en la necesidad de que los pilotos sigan aplicando vigilancia, especialmente cuando vuelen cerca de tormentas o por zonas donde se pronostique cizalladura del viento.

6.9.2 De todos los conocimientos y de la experiencia adquiridos hasta ahora se ponen de manifiesto los siguientes principios fundamentales que los pilotos deben tener presentes:

- a) EVITE las áreas en que se sabe que se produce cizalladura del viento.
- b) Evalúe las condiciones meteorológicas y del medio ambiente.
- c) Utilice y siga los SOP.
- d) Esté alerta y tome las precauciones necesarias cada vez que sea elevada la probabilidad de que se produzca cizalladura del viento.
- e) No dude nunca en poner en práctica los procedimientos de restablecimiento si encuentra inesperadamente cizalladura del viento.
- f) En caso de duda, retarde el despegue o, si se ha indicado la presencia de cizalladura del viento, no vacile en efectuar una aproximación frustrada o mantenerse en espera hasta que mejoren las condiciones. Como último recurso, efectúe el aterrizaje en un aeródromo de alternativa apropiado.

— — — — —

Referencias

1. United States Federal Aviation Administration, 1987: FAA Wind Shear Training Aid, Volumes 1 and 2.
 2. Campbell, 1983: A conceptual framework for using Doppler radar — Acquired atmospheric data for flight simulation, NASA Technical Paper No. 2192.
 3. Frost, et al., 1985: Microburst wind shear models from the JAWS project, United States Department of Transport, Report No. DOT/FAA-PM — 85/18.
 4. Hopkins, 1984: Microburst explored, *Flight International*, London.
 5. Hopkins, 1985: Wind shear escape, *Flight International*, London.
 6. Klehr, 1986: Wind shear simulation enters the fourth dimension, *ICAO Bulletin*.
 7. World Meteorological Organization, 2002: *Guidelines for the education and training of personnel in meteorology and operational hydrology*, WMO Publication No. 258, Volume I, Fourth Edition.
-

Apéndice 1

EXPOSICIÓN DE REQUISITOS OPERACIONALES

(Véase el Preámbulo)

1. INFORMACIÓN PROPORCIONADA AL PILOTO

1.1 Es necesario para las operaciones proporcionar información al piloto sobre cizalladura del viento y turbulencia a baja altura (sea cual fuere la causa) a fin de que pueda afrontarlas y conservar el dominio de la aeronave en condiciones de seguridad.

1.2 Hasta que se logre el perfeccionamiento de equipo de a bordo y en tierra fiable en las operaciones, esta información debería basarse en los informes de las aeronaves o en las observaciones meteorológicas efectuadas en tierra o en una evaluación de las condiciones meteorológicas presentes.

2. EQUIPO TERRESTRE

Es necesario para las operaciones instalar en tierra equipo que permita obtener la información siguiente, que se proporcionará a los pilotos antes del despegue o antes del comienzo de la aproximación inicial:

- a) cambios significativos del viento en la superficie o a lo largo de la pista; y
- b) cambios significativos del viento a lo largo de la trayectoria de despegue y de la trayectoria de aproximación final hasta 500 m (1 600 ft) por encima del nivel de la pista, prestando atención especial a la capa entre el nivel de la pista y una altura de 150 m (500 ft).

Nota.— El valor de 500 m (1 600 ft) no debería considerarse como un límite si debido a las condiciones locales se estima necesario elevarlo.

3. EQUIPO DE A BORDO

Es necesario para las operaciones instalar equipo de a bordo que pueda detectar la presencia de cizalladura del viento o turbulencia significativa a baja altura (sea cual fuere la causa) y pueda:

- a) proporcionar al piloto oportunamente un aviso y la información necesaria para mantener en condiciones de seguridad la trayectoria de vuelo deseada o tomar medidas para evitar la cizalladura y la turbulencia; y

- b) indicar que se están alcanzando los límites especificados para la certificación del equipo de aterrizaje automático.

4. INSTRUCCIÓN

Es necesario para las operaciones que los pilotos hayan recibido instrucción para contrarrestar los efectos de la cizalladura del viento y la turbulencia a baja altura. Debería proporcionarse toda la información relativa a esta cuestión, al igual que las técnicas de vuelo recomendadas, los datos de perfiles de vuelo y la información sobre la actuación del tipo de aeronave de que se trate.

Apéndice 2

RECOMENDACIONES DEL COMITÉ DE LA ACADEMIA NACIONAL DE CIENCIAS DE LOS ESTADOS UNIDOS SOBRE LA CIZALLADURA DEL VIENTO A BAJA ALTITUD Y SUS PELIGROS PARA LA AVIACIÓN (1983)

(Véase 3.9.2 y 3.9.3)

Nota.— Se reproduce el texto que sigue con la autorización del Comité de la National Academy of Sciences de los Estados Unidos.

Las recomendaciones del Comité^a de la Academia nacional de ciencias se clasifican en cuatro amplias categorías: generalidades, detección y pronóstico, actuación y operaciones de las aeronaves e investigaciones. La numeración de las recomendaciones no supone ningún orden de prioridad. La extensa serie de recomendaciones concretas pone de manifiesto la complejidad del problema de la cizalladura del viento a baja altitud.

1. GENERALIDADES

Necesidad de un programa integrado referente a la cizalladura del viento

1.1 Para velar por la seguridad de los pasajeros, la FAA y el sector aeronáutico deberían considerar en su conjunto las numerosas facetas del problema de la cizalladura del viento a baja altitud. La FAA debería elaborar e implantar un programa coherente y persistente que abarque los aspectos de instrucción, meteorológicos, tecnológicos y operacionales de los riesgos que supone la cizalladura del viento a baja altitud.

Programa de instrucción sobre cizalladura del viento

1.2 La FAA y el sector aeronáutico deberían elaborar y difundir lo más ampliamente posible información actualizada sobre cizalladura del viento que provenga de fuentes competentes. Esta información debería insistir especialmente en el modo de evitar la cizalladura del viento y describir las técnicas de dominio del avión para el restablecimiento después del encuentro con este fenómeno. En dicha información deberían tenerse en cuenta todos los tipos de aeronaves con orientación apropiada para cada clase. Debería contener recomendaciones sobre los medios más eficaces de instrucción para los pilotos.

a. Aunque es satisfactorio señalar que, cuando se publique el presente manual, muchas de las recomendaciones del Comité ya se habrán aplicado, no obstante, se reproducen estas últimas textualmente a fin de ilustrar los problemas que se presentaron en materia de cizalladura del viento durante los últimos dos decenios.

1.3 La FAA debería revisar y actualizar su Circular consultiva de 1979 (AC 00-50A) sobre la cizalladura del viento, así como el *Airman's Information Manual* (AIM) para ofrecer la información más reciente, incluso las técnicas de detección, procedimientos de alerta y aviso, los efectos de la cizalladura del viento en la actuación de la aeronave y los procedimientos de restablecimiento después del encuentro con cizalladura del viento.

Comunicaciones piloto — controlador

1.4 La FAA debería fomentar el empleo de terminología normalizada y de comunicación mejorada entre tripulaciones de vuelo y torres de control. Debería elaborarse un sistema normalizado de informes de piloto (PIREP) para la notificación de encuentros de cizalladura del viento a baja altitud. Los PIREP deberían ser obligatorios y contener una notificación sobre la ubicación, intensidad y naturaleza de la cizalladura del viento encontrada, sirviéndose de terminología uniforme y normalizada. Los controladores deberían comunicar estas notificaciones a todas las tripulaciones de vuelo que se encuentren en las cercanías. Además, deberían investigarse técnicas de radiodifusión directa a los pilotos de datos sobre cizalladura del viento obtenidos del sistema de alerta de cizalladura del viento a baja altura (LLWSAS) o de otros sensores.

Perfeccionamiento de un sistema de detección de cizalladura del viento

1.5 La FAA debería elegir un emplazamiento para ensayar las técnicas de detección directa y a distancia en un sistema completo de detección de cizalladura del viento a baja altitud y de comunicación de información a los pilotos y a los controladores, así como para comprobar la utilización de la información obtenida de este modo en el sistema de control de tránsito aéreo. Estos ensayos deberían efectuarse en un aeropuerto importante donde ocurre con relativa frecuencia cizalladura del viento.

2. DETECCIÓN Y PRONÓSTICO

Sistema de alerta de cizalladura del viento a baja altura (LLWSAS)

2.1 LLWSAS es el único sistema actualmente disponible a breve plazo para detectar cizalladura del viento a baja altitud con carácter operacional y debería hacerse todo lo posible para evaluar y mejorar su rendimiento. Entre las posibilidades que ofrece el sistema, figuran mejor tratamiento de las señales, menor separación entre un mayor número de sensores, mejor reacción de los sensores y técnicas mejoradas de presentación visual del viento, así como criterios relativos a la expedición de avisos de cizalladura del viento y la posible utilización de sensores de presión instalados en tierra para completar la información LLWSAS. Se está perfeccionando actualmente un sistema LLWSAS para instalarlo en el Aeropuerto internacional de Nueva Orleans que se ensayará operacionalmente a principios de 1984 y debería servir de base para la modificación de las instalaciones LLWSAS actuales y la mejora del rendimiento para futuras instalaciones. Con arreglo a los resultados de los ensayos en Nueva Orleans, la FAA debería modificar los sistemas LLWSAS actuales e instalar sistemas mejorados en todos los aeropuertos de gran densidad de tránsito que disponen de sistemas automáticos de área terminal (153 aeropuertos) donde es probable que se produzcan cizalladuras del viento peligrosas.

Registro y análisis de datos LLWSAS

2.2 Los datos de las mediciones del viento proporcionados por el LLWSAS deberían registrarse y analizarse con objeto de evaluar el rendimiento del sistema y obtener más información sobre las propiedades climáticas de la cizalladura del viento a baja altitud. Este ejercicio debería efectuarse en todos los aeropuertos equipados con LLWSAS.

Utilización de los datos radar disponibles

2.3 La red actual de radares meteorológicos, cuyo funcionamiento está a cargo del NWS, debería utilizarse más eficazmente con objeto de juzgar la probabilidad de que se produzcan condiciones de cizalladura del viento. Estos radares detectan chubascos de lluvia, tormentas y fenómenos frecuentemente relacionados con cizalladura del viento. La información procedente de los radares meteorológicos debería ponerse a disposición de los controladores de tránsito aéreo en el momento oportuno y en forma fácilmente comprensible.

Radar meteorológico de la próxima generación (NEXRAD)

2.4 El sistema radar meteorológico Doppler de la próxima generación (NEXRAD) se debería perfeccionar e instalar lo más rápidamente posible. Este sistema radar de largo alcance satisfará muchas necesidades nacionales relacionadas con la detección, pronóstico y aviso de fenómenos meteorológicos violentos. Por lo que se refiere a la aviación, el sistema NEXRAD puede utilizarse para detectar y vigilar los fenómenos meteorológicos significativos a lo largo de las rutas de vuelo y, si se instala en un aeropuerto o en sus cercanías, para detectar la cizalladura del viento a baja altitud o sus precursores. Además, el radar Doppler permitirá que se avance en la elaboración de técnicas radar para la detección de cizalladura del viento a baja altitud, así como en el perfeccionamiento de radares Doppler de área terminal especializados.

Radar meteorológico de terminal de aeropuerto

2.5 La FAA debería tomar medidas inmediatas destinadas al perfeccionamiento de un radar Doppler de impulsos que pueda utilizarse para observar las condiciones meteorológicas en los aeropuertos y en sus cercanías. Este sistema radar de terminal de aeropuerto debería poder funcionar con un elevado grado de automatización y proporcionar información sobre la intensidad de la cizalladura del viento, de la turbulencia y de la precipitación a baja altitud. Debe poder proporcionar información actualizada cada minuto y disponer de determinadas características, tales como la eliminación de parásitos en la superficie y una resolución espacial satisfactoria.

Utilización de las observaciones del radar meteorológico de terminal aérea utilizado en el aeropuerto

2.6 Con objeto de que el radar Doppler de terminal aérea sea de suma utilidad para los controladores de tránsito aéreo y los pilotos, deberían desplegarse esfuerzos concertados para elaborar procedimientos de análisis, presentación y utilización de sus observaciones.

Sensores a distancia a bordo de las aeronaves

2.7 Deberían proseguirse las investigaciones sobre la utilización de lidars Doppler de a bordo y de radares Doppler que funcionen en microondas como medio para detectar la cizalladura del viento a baja altitud.

3. ACTUACIÓN Y OPERACIONES DE AERONAVES

Efectos de la cizalladura del viento en las características de vuelo

3.1 La FAA debería patrocinar la realización de investigaciones analíticas y en simulador para determinar:

- a) la idoneidad de las aeronaves de transporte para la penetración de la cizalladura del viento y el restablecimiento, con arreglo a diversos sistemas de detección, guía y control disponibles a bordo; y
- b) los efectos de la cizalladura del viento en las diversas categorías representativas de aviones y helicópteros de la aviación general de modo que pueda proporcionarse información debidamente confirmada relativa a sus características de reacción y técnicas de pilotaje en condiciones de cizalladura del viento.

Procedimientos operacionales de aeronave

3.2 La FAA debería asegurarse de que los transportistas y otros explotadores comerciales den instrucciones a sus tripulaciones de vuelo respecto a las medidas que deben tomar si inesperadamente encuentran cizalladura del viento a baja altitud durante el despegue o el aterrizaje. Además, debería alentar a los explotadores de aeronaves de reacción a que incluyan en sus manuales los procedimientos operacionales recomendados en la Circular de asesoramiento sobre cizalladura del viento. Los constructores de aeronaves deberían recomendar secuencias de modificación de la configuración (tren de aterrizaje, flaps, potencia, expoliador, etc.) que ofrezcan la más alta probabilidad de restablecimiento en caso de encuentro con cizalladura del viento. Debería enseñarse a los pilotos a que rebasen los límites normales de empuje máximo y apliquen el empuje de emergencia, de ser necesario.

Ayudas de guía y control

3.3 Los sensores y las ayudas de guía instalados a bordo deberían evaluarse sistemáticamente para determinar sus ventajas con miras a su futuro perfeccionamiento y posible instalación en las aeronaves actuales. Se trata de directores de vuelo modificados, sistemas de gestión de vuelo para la velocidad respecto al suelo y la velocidad aerodinámica, sensores de aceleración vertical y sensores de régimen de energía. Deberían agregarse indicadores de ángulo de ataque a los instrumentos de a bordo de las aeronaves de transporte para utilizarlos en las maniobras necesarias en caso de cizalladura del viento. El ángulo de ataque debería preverse ya sea en la forma de una variable por separado o de presentación de información en el tablero de mando. Los sensores deberían dar a las tripulaciones de vuelo un aviso sonoro en caso de cizalladura del viento peligrosa.

Normalización de los modelos de cizalladura del viento

3.4 La FAA debería patrocinar un programa que tenga por objeto elaborar y definir modelos normalizados de cizalladura del viento basados en los datos meteorológicos más recientes. Estos modelos son necesarios para diseñar y certificar subsistemas de aeronave, así como para utilizar simuladores destinados a la instrucción. La FAA debería tratar de conseguir la participación en el programa de otros organismos gubernamentales, constructores de aeronaves, explotadores comerciales y otras partes interesadas.

Certificación de los sistemas de a bordo

3.5 La FAA debería actualizar sus requisitos relativos a la certificación de los sistemas de a bordo de alerta de cizalladura del viento, de guía y de mando automático de vuelo.

Instrucción mediante simulación de la cizalladura del viento

3.6 La FAA y el sector aeronáutico deberían colaborar en la investigación de medios nuevos e innovadores destinados a conseguir que la mejor instrucción posible mediante simulación de cizalladura del viento sea accesible al mayor número posible de pilotos, incluidos los de la aviación general.

4. INVESTIGACIONES

Efectos de las lluvias intensas

4.1 Deberían proseguirse las investigaciones respecto al modo en que las lluvias intensas afectan a las características aerodinámicas de las aeronaves cuando vuelan a poca velocidad. Debería prestarse atención a los posibles efectos perjudiciales de las lluvias intensas en la sustentación, actuación y manejabilidad de las aeronaves, incluso sus efectos en los sistemas de detección de cizalladura del viento y en los sensores de a bordo.

Investigación sobre la naturaleza de la cizalladura del viento a baja altitud

4.2 Aún queda bastante por averiguar respecto a las diversas clases de cizalladura del viento, así como sobre las condiciones meteorológicas que ocasionan este fenómeno o que lo acompañan. Estos conocimientos son necesarios para reducir los riesgos que presenta la cizalladura del viento a baja altitud. Las investigaciones deberían abarcar observaciones suplementarias sobre el terreno, así como la elaboración de modelos teóricos a las escalas pertinentes — ya sea entre unos 1 000 ft y 10 a 20 millas y entre algunos minutos y varias horas.

4.3 El conjunto actual de datos obtenidos mediante diversos programas de investigación debería examinarse y completarse de nuevo, en el momento oportuno, aplicándose un programa de investigaciones sobre el terreno en la zona sudeste de los Estados Unidos, que se caracteriza por su humedad. El análisis de los datos obtenidos mediante el proyecto JAWS debería utilizarse para planificar cualquier otra nueva investigación sobre el terreno. Las investigaciones básicas sobre los orígenes de las fuertes corrientes descendentes originadas de las tormentas y los posibles métodos de pronóstico deberían constituir un elemento importante de todo nuevo programa.

Apéndice 3

ANÁLISIS MATEMÁTICO DEL EFECTO DE LA CIZALLADURA DEL VIENTO EN LA SUSTENTACIÓN

Nota.— El texto^a siguiente se reproduce con la amable autorización del Dr. T.T. Fujita. La OACI ha modificado los números de la tabla y la figura en el presente apéndice.

La corriente de aire que afecta a las operaciones de aeronaves se divide aproximadamente en “turbulencia” y “cizalladura del viento”. Una aeronave en vuelo que encuentre corriente turbulenta muestra movimientos irregulares y erráticos al mismo tiempo que mantiene, más o menos, su trayectoria de vuelo prevista. La cizalladura del viento, con o sin turbulencia, altera la fuerza de sustentación que actúa en la aeronave, lo que da por resultado un movimiento descendente o ascendente importante.

En meteorología, la cizalladura del viento es la variación local de la velocidad del viento en una dirección dada. Las tres componentes de la cizalladura del viento pueden describirse expresando la velocidad del viento W por:

$$W = iu + jv + kw \quad (1)$$

donde i, j, k son vectores unitarios que apuntan hacia las direcciones x, y, z , mientras que u, v, w son las componentes x, y, z del vector viento.

Desde el punto de vista de la aviación, la cizalladura del viento es la variación en el tiempo de la velocidad del viento a lo largo de la trayectoria de una aeronave dada, que puede expresarse como:

$$\frac{\Delta W}{\Delta t} = G \frac{\partial W}{\partial L} + \frac{\partial W}{\partial t} \quad (2)$$

donde L es la distancia medida a lo largo de la trayectoria de vuelo. El segundo término de esta ecuación indica la variación local de los vientos causada por la formación o el desarrollo de un sistema de viento en el que penetra una aeronave. Es decir, el segundo término puede que no exista antes de la penetración, mientras que el primer término indica el cambio de los vientos a medida que una aeronave entra en un sistema de cizalladura del viento existente.

Observando que la trayectoria de vuelo está incluida en el plano $x-z$ en la Figura A3-1, definimos la cizalladura de los tres vientos componentes u, v, w por:

a. Extraído del libro “The Downburst” del Dr. Fujita, publicado por el Satellite and Mesometeorological Research Project (SMRP), Departamento de Ciencias Geofísicas, Universidad de Chicago.

$$\frac{\Delta u}{\Delta t} = \text{cizalladura del viento de frente, + viento de frente; — viento de cola} \quad (3)$$

$$\frac{\Delta v}{\Delta t} = \text{cizalladura del viento de costado, + de la derecha; — de la izquierda} \quad (4)$$

$$\frac{\Delta w}{\Delta t} = \text{cizalladura vertical del viento, + ascendente; — descendente} \quad (5)$$

Efectos de la cizalladura del viento en la fuerza de sustentación

Una aeronave con una velocidad verdadera A , que vuela dentro de un viento W tridimensional, avanza con la velocidad G respecto al suelo. La fuerza de sustentación que actúa sobre la aeronave es perpendicular al vector A y la fuerza de resistencia al avance apunta en sentido opuesto al vector A . Empleado los símbolos de la Figura A3-1, la fuerza de sustentación puede expresarse por:

$$F = \frac{1}{2} \rho A^2 C_L S \quad (6)$$

donde ρ es la densidad del aire, C_L el coeficiente de sustentación y S el área de la sección transversal de la fuerza de sustentación que actúa sobre la aeronave. Puesto que β es pequeño y θ y G no varían con el tiempo tan rápidamente como los vientos, podemos aproximar la velocidad respecto al suelo y el ángulo de ataque como:

$$G \cong A + u \quad \text{ó} \quad 0 = \frac{\Delta A}{\Delta u} + 1 \quad (7)$$

$$\alpha = \theta - \gamma + \frac{w}{G} \quad \text{ó} \quad \frac{\partial \alpha}{\partial w} = 0 - 0 + \frac{1}{G} \quad (8)$$

El incremento de la fuerza de sustentación resultante de la variación de u y w se calcula mediante la ecuación diferenciadora 6, como:

$$\Delta F_L = \frac{1}{2} \rho C_L A^2 S \left(\frac{2}{A} \frac{\partial A}{\partial u} \Delta u + \frac{1}{C_L} \frac{\partial C_L}{\partial \alpha} \frac{\partial \alpha}{\partial w} \Delta w \right) \quad (9)$$

Empleando las ecuaciones 7 y 8, simplificamos la ecuación 9 en

$$\frac{\Delta F_L}{F_L} = - \frac{2}{A} \Delta u + \frac{k}{G} \Delta w \quad (10)$$

$$\text{donde } k = \frac{1}{C_L} \frac{\partial C_L}{\partial \alpha} \text{ (radianes)} = \frac{180}{\pi C_L} \frac{\partial C_L}{\partial \alpha} \text{ (grados)} \quad (11)$$

se determina por las características del coeficiente de sustentación durante la penetración en una cizalladura del viento. Esta ecuación indica que la pérdida de sustentación no la ocasiona únicamente la pérdida de velocidad aerodinámica sino también la pérdida de ángulo de ataque, lo cual, a su vez, reduce el coeficiente de sustentación.

Tabla A3-1. Pérdida fraccionaria (%) de la fuerza de sustentación debida a un incremento de un nudo del viento de cola o de un incremento de un nudo de la corriente descendente. Para fines de simplificación, se supuso que $A = G = 150$ kt

	Ángulo de ataque				
	0°	5°	10°	15°	20°
Pérdida de sustentación debida al viento de cola	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3% por kt
Pérdida de sustentación debida a la corriente descendente	13,2	4,5	2,5	1,3	0,5% por kt

En la Figura A3-2 se indica una curva representativa del coeficiente de sustentación para una aeronave de ala en flecha durante una configuración de despegue con flaps desplegados. Los valores que figuran en la Tabla A3-1, calculados con arreglo a la figura, revelan que es constante la pérdida de sustentación resultante de un viento de cola, independientemente del ángulo de ataque en que vuela una aeronave. Por otro lado, la pérdida de sustentación aumenta apreciablemente al disminuir el ángulo de ataque. La ecuación 10 indica que la reducción del ángulo de cabeceo, seleccionado para ganar velocidad aerodinámica en una cizalladura del viento de cola/corriente descendente, puede ocasionar una pérdida de sustentación y un fuerte descenso subsiguiente.

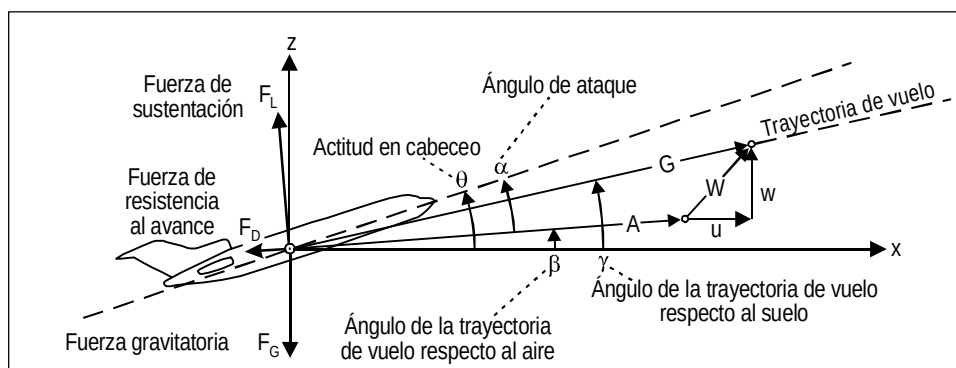


Figura A3-1. Definición de las cantidades empleadas en este capítulo:
 F_L = fuerza de sustentación; F_G = fuerza gravitatoria; F_D = fuerza de resistencia al avance;
 α = ángulo de ataque; β = ángulo de trayectoria de vuelo respecto al aire;
 γ = ángulo de trayectoria de vuelo respecto al suelo; θ = actitud de cabeceo;
 W = vector viento, siendo u, v, w sus componentes x, y, z ;
 A = velocidad verdadera; y G = velocidad respecto al suelo

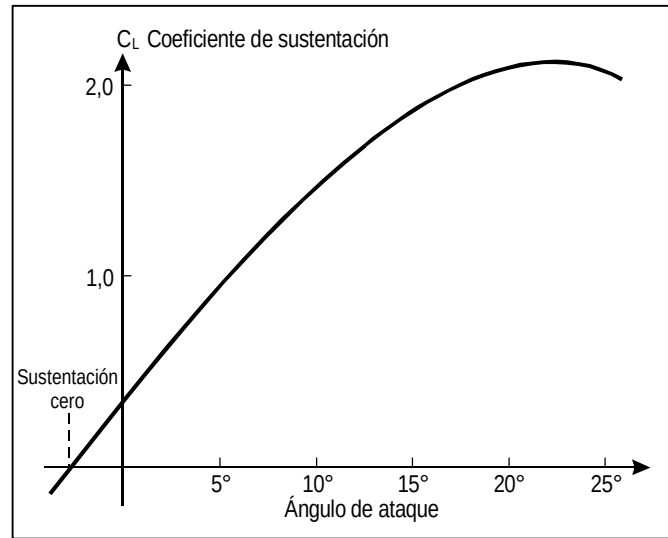


Figura A3-2. Coeficiente de sustentación de aeronaves de ala en flecha con los flaps a 15° y configuración de tren replegado.
El ángulo de ataque es relativo al fuselaje.
El ángulo de ataque relativo al viento es de unos 2° mayor que el ángulo de ataque relativo al fuselaje.

Apéndice 4

ALERTA DE CIZALLADURA DEL VIENTO Y TURBULENCIA EN HONG KONG (CHINA)

(véase 5.1.39)

Nota.— El texto siguiente se reproduce con el permiso del Observatorio de Hong Kong (China). La OACI ha modificado los números de las figuras en el presente apéndice.

1. ANTECEDENTES

1.1 El Observatorio de Hong Kong (HKO) tiene la responsabilidad de proporcionar servicios meteorológicos aeronáuticos al Aeropuerto internacional de Hong Kong (HKIA) en Chek Lap Kok. Expide alertas de cizalladura del viento (en caso de un cambio de 15 kt o más en el viento de frente o de cola) y turbulencia (para turbulencias moderadas o fuertes).

1.2 Geográficamente, se construyó el HKIA en terreno que antes ocupaba el mar, al norte de la isla de Lantau, más bien montañosa, con picos que se elevan hasta unos 1 000 m con valles que bajan hasta unos 400 m entre ellos. En la Figura A4-1 se ilustra el terreno de la isla y el emplazamiento del HKIA en el mismo. Al noreste del aeropuerto están situadas varias colinas más pequeñas con picos que se elevan entre 400 y 600 m. En dicho entorno de costa y colinas, una amplia variedad de fenómenos meteorológicos puede traer cizalladura del viento y turbulencia al HKIA, por ejemplo:

- a) vientos que soplan por terreno montañoso, o sea, ocasionados por el terreno (Figura A4-2);
- b) microrráfagas y frentes de ráfagas, o sea, ocasionados por tormentas (Figuras A4-3 y A4-4);
- c) convergencia de brisa de mar con vientos ambientes (de tierra) (Figura A4-5); y
- d) corriente en chorro a poca altura (Figura A4-6).

2. ALERTA DE CIZALLADURA DEL VIENTO Y TURBULENCIA

2.1 Entre los sensores meteorológicos para vigilar la cizalladura del viento y la turbulencia en el HKIA y sus alrededores cabe señalar los siguientes:

- a) un radar Doppler meteorológico en la terminal (TDWR) instalado estratégicamente a unos 12 km al noreste del aeropuerto (Figura A4-7);
- b) una red de anemómetros en la superficie, valles y cimas de las colinas;
- c) tres boyas meteorológicas (Figura A4-8) entre una o dos millas marinas (NM) de los umbrales de las pistas;
- d) dos perfilógrafos del viento en la isla Lantau; y

- e) un sistema Doppler de fotodetección y telemetría (LIDAR) de impulsos en el aeropuerto (Figura A4-8).

Véase en la Figura A4-1 el emplazamiento de dichos sensores meteorológicos.

2.2 El TDWR es eficaz para detectar microrráfagas y frentes de ráfagas ocasionados por tormentas en la presencia de precipitación. El LIDAR constituye un complemento al TDWR para detectar cizalladura del viento en condiciones meteorológicas normales. Los anemómetros situados en diversos emplazamientos proporcionan información sobre la cizalladura del viento horizontal y vertical. Los perfilógrafos efectúan mediciones a diferentes alturas para proporcionar información sobre la cizalladura del viento vertical.

2.3 Utilizando datos procedentes de la serie de sensores meteorológicos, se producen automáticamente mediante algoritmos de cálculo alertas sobre posible cizalladura del viento y turbulencia a unas 3 NM de los umbrales de las pistas. Dichas alertas se actualizan con una frecuencia de al menos cada minuto para enlace a las aeronaves.

2.4 También se expiden como alertas para radiodifusión a las aeronaves que siguen los informes de los pilotos sobre la presencia de cizalladura del viento y turbulencia encontradas por debajo de los 500 m (1 600 ft) y recibidos dentro de un breve plazo por HKO. Dichas alertas son normalmente eficaces durante al menos una hora después del informe de piloto en cuestión.

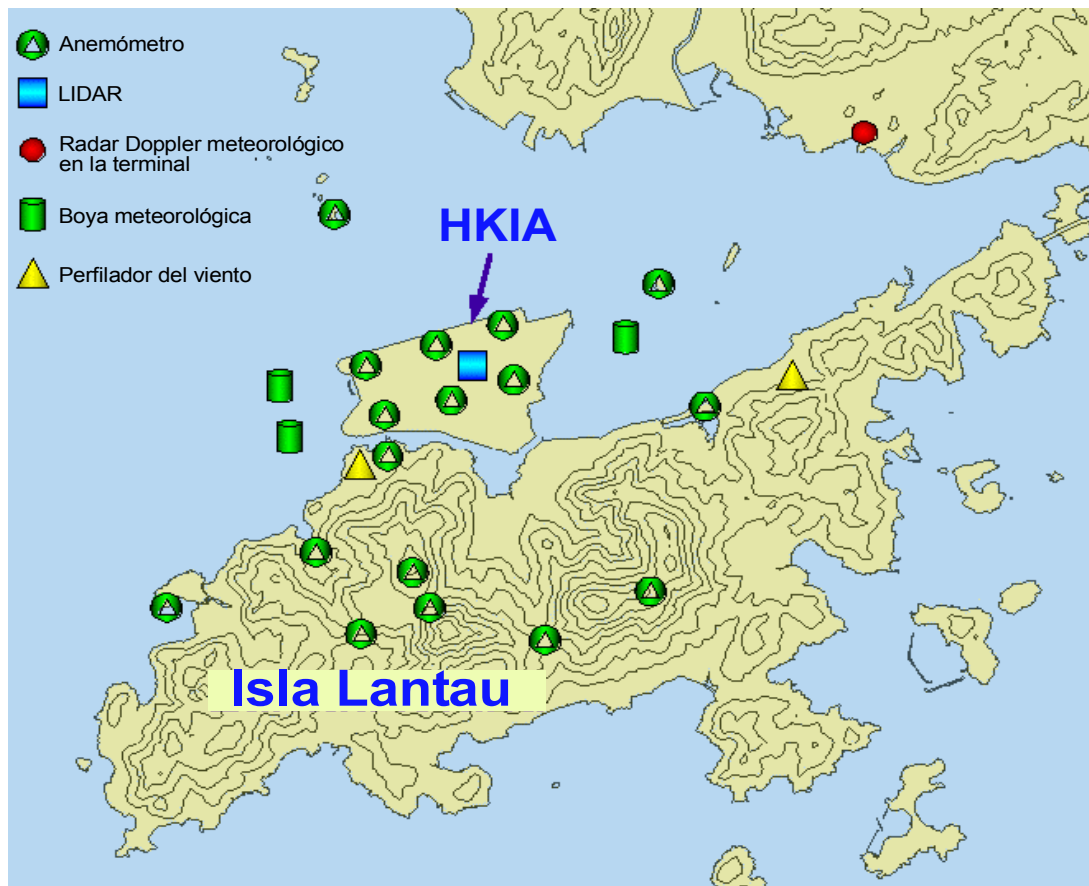


Figura A4-1. Mapa del Aeropuerto internacional de Hong Kong (HKIA) y sus cercanías. Las curvas de nivel del terreno se ilustran con intervalos de 100-m.

Alertas de cizalladura del viento

2.5 Las alertas automáticas sobre cizalladura del viento se clasifican según dos niveles: “alerta de microrráfaga” (MBA) para cizalladura del viento con pérdida de viento de frente de 30 kt o más, acompañada de precipitación; y “alerta de cizalladura del viento” (WSA) para cizalladura del viento con pérdida o ganancia de viento de frente de 15 kt o más (salvo MBA). Se proporciona una alerta refundida para cada corredor de aproximación o salida basándose en un sistema prioritario en el que se tienen en cuenta la gravedad de las alertas y el nivel de fiabilidad de las diversas fuentes de datos que generan las alertas.

2.6 Utilizando datos procedentes de la serie de sensores meteorológicos, el pronosticador aeronáutico de HKO expide también alertas de cizalladura del viento como suplemento a las alertas automatizadas basadas en técnicas elaboradas mediante el estudio de los informes de los pilotos sobre cizalladura del viento y las condiciones meteorológicas que la acompañan. Estas técnicas se automatizan progresivamente basándose en su eficacia, que se determina después de su verificación respecto a los datos de vuelo de a bordo y los informes de los pilotos.

Alertas de turbulencia

2.7 Las alertas automáticas de turbulencia se clasifican en dos niveles, basándose en los mismos umbrales de intensidad que los que se adoptan para la notificación automática de turbulencia a las aeronaves y se expiden con referencia a aeronaves de categoría pesada: “turbulencia moderada” para turbulencia con un régimen de disipación de remolinos (EDR) entre 0,3 y 0,5; y “turbulencia fuerte” para turbulencia con un EDR de 0,5 o más. La fuerza de la turbulencia ocasionada por el terreno en los corredores de llegada o salida se determina basándose en la velocidad y dirección del viento y sus fluctuaciones medidas por la red de anemómetros.

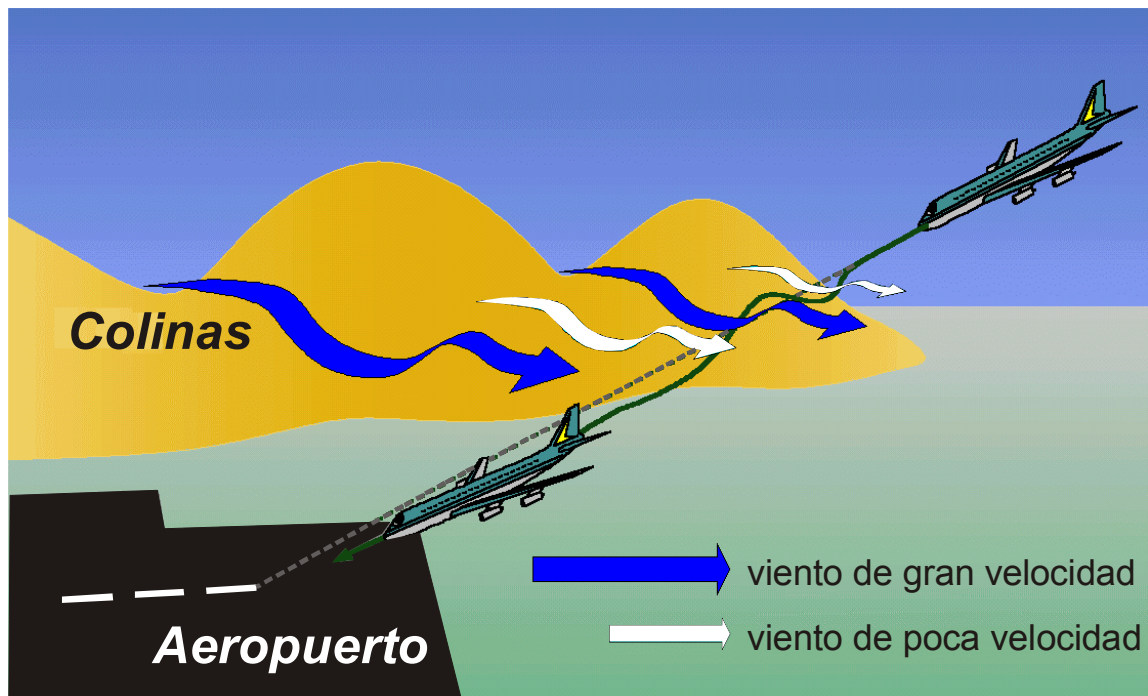


Figura A4-2. Un modelo característico de la corriente de aire ocasionada por el terreno, con corrientes de aire de alta velocidad a partir de los valles y de poca velocidad a partir de las cimas

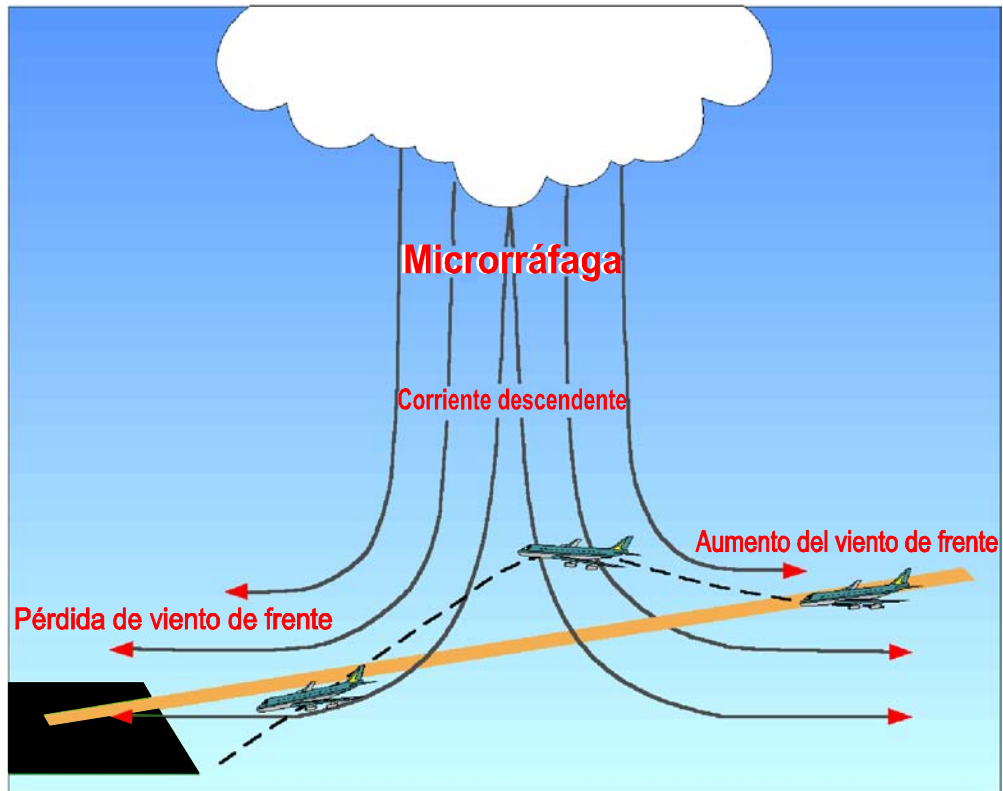


Figura A4-3. Cizalladura del viento ocasionada por una microráfaga

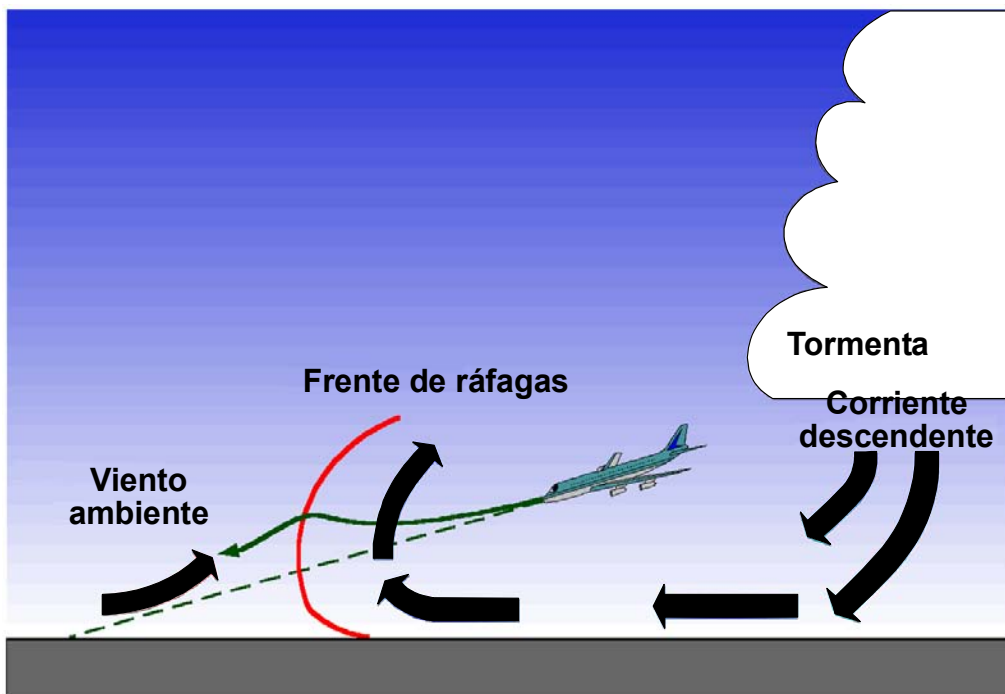


Figura A4-4. Cizalladura del viento ocasionada por un frente de ráfagas

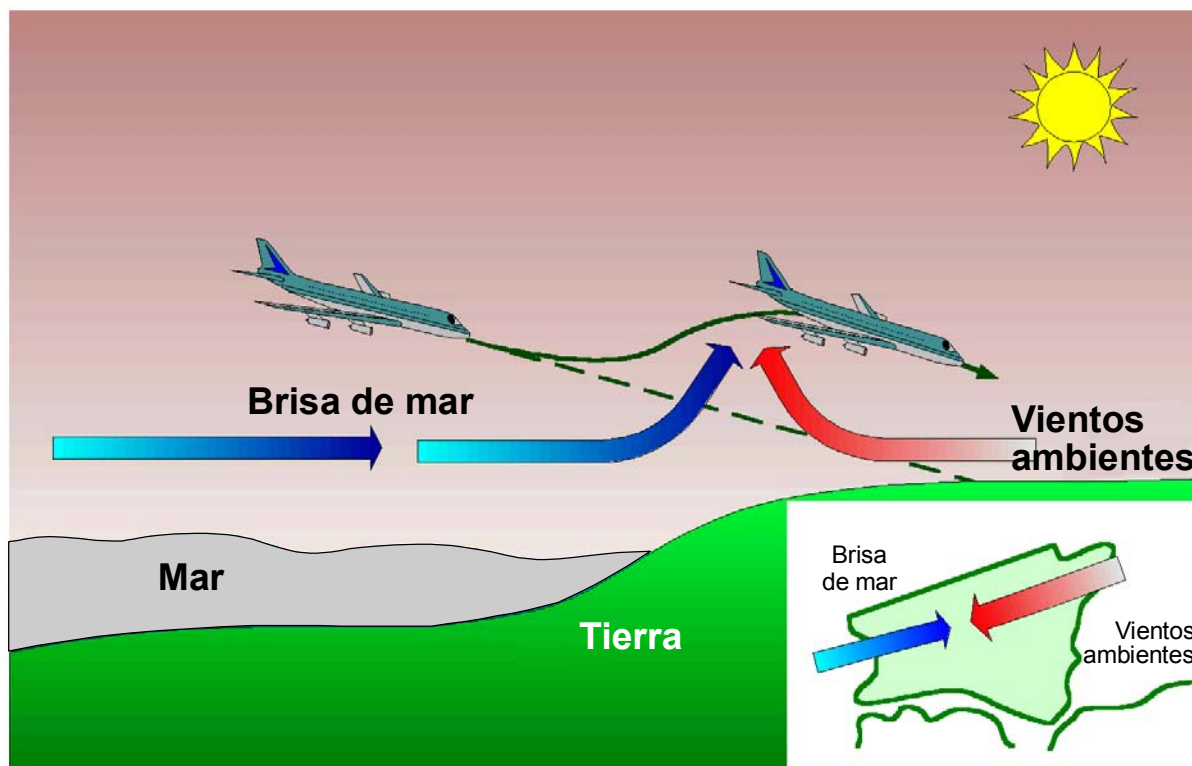


Figura A4-5. Cizalladura del viento ocasionada por una brisa de mar

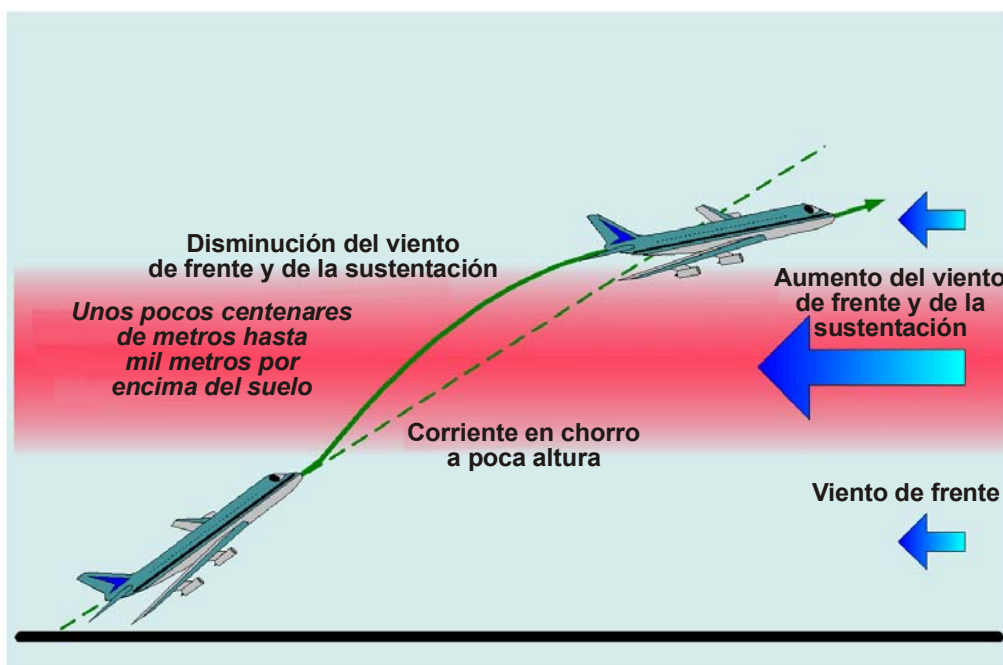


Figura A4-6. Cizalladura del viento ocasionada por una corriente en chorro a poca altura



Figura A4-7. El radar Doppler meteorológico en la terminal en Hong Kong



Figura A4-8. Instalaciones de detección de cizalladura del viento establecidas a principios de los años 2000 — boya meteorológica (izquierda) y LIDAR (derecha)

Apéndice 5

PERFILÓGRAFO DEL VIENTO UHF EN EL AEROPUERTO NICE CÔTE D'AZUR

(Datos brutos procedentes del sistema perfilógrafo del viento,
2 de septiembre de 2000, 1400–1700 UTC)

(véase 5.1.43)

Nota.— La tabla y la figura siguientes se reproducen con el permiso de Météo-France; la OACI les ha dado números en el presente apéndice.

Tabla A5-1. Mensajes de cizalladura del viento del 2 de septiembre de 2000

1656 h y 1657 h L	1658 h y 1659 h L	1700 h L	1701 h L
Cizalladura independiente de la orientación de la pista:	Cizalladura independiente de la orientación de la pista:	Cizalladura independiente de la orientación de la pista:	Cizalladura independiente de la orientación de la pista:
Moderada a 142 m Moderada a 195 m Moderada a 285 m Fuerte a 321 m Fuerte a 428 m Fuerte a 464 m Ligera a 554 m Fuerte a 643 m	Moderada a 142 m Fuerte a 213 m Fuerte a 249 m Fuerte a 285 m Fuerte a 536 m	Fuerte a 106 m Fuerte a 142 m Fuerte a 321 m Fuerte a 392 m Fuerte a 464 m Fuerte a 536 m Fuerte a 643 m	Fuerte a 321 m Fuerte a 392 m Fuerte a 464 m Fuerte a 536 m Fuerte a 643 m
Orientación de la pista: 40	Orientación de la pista: 40	Orientación de la pista: 40	Orientación de la pista: 40
Moderada a 195 m: en dirección opuesta a la pista Ligera a 285 m: perpendicular a la pista Moderada a 321 m: misma dirección que la pista Fuerte a 321 m: perpendicular a la pista Moderada a 428 m: misma dirección que la pista Ligera a 428 m: perpendicular a la pista Moderada a 464 m: en dirección opuesta a la pista Moderada a 464 m: perpendicular a la pista Fuerte a 643 m: en dirección opuesta a la pista Moderada a 643 m: perpendicular a la pista	Moderada a 142 m: perpendicular a la pista Fuerte a 213 m: en dirección opuesta a la pista Fuerte a 249 m: misma dirección que la pista Fuerte a 285 m: en dirección opuesta a la pista Moderada a 285 m: perpendicular a la pista Moderada a 536 m: misma dirección que la pista Moderada a 536 m: perpendicular a la pista	Ligera a 106 m: misma dirección que la pista Moderada a 106 m: perpendicular a la pista Moderada a 142 m: perpendicular a la pista Moderada a 321 m: en dirección opuesta a la pista Moderada a 321 m: perpendicular a la pista Moderada a 392 m: misma dirección que la pista Moderada a 464 m: en dirección opuesta a la pista Ligera a 464 m: perpendicular a la pista Fuerte a 536 m: misma dirección que la pista Ligera a 536 m: perpendicular a la pista Moderada a 643 m: en dirección opuesta a la pista Moderada a 643 m: perpendicular a la pista	Moderada a 321 m: en dirección opuesta a la pista Moderada a 321 m: perpendicular a la pista Fuerte a 392 m: misma dirección que la pista Moderada a 392 m: perpendicular a la pista Moderada a 464 m: en dirección opuesta a la pista Ligera a 464 m: perpendicular a la pista Fuerte a 536 m: misma dirección que la pista Ligera a 536 m: perpendicular a la pista Moderada a 643 m: en dirección opuesta a la pista Moderada a 643 m: perpendicular a la pista

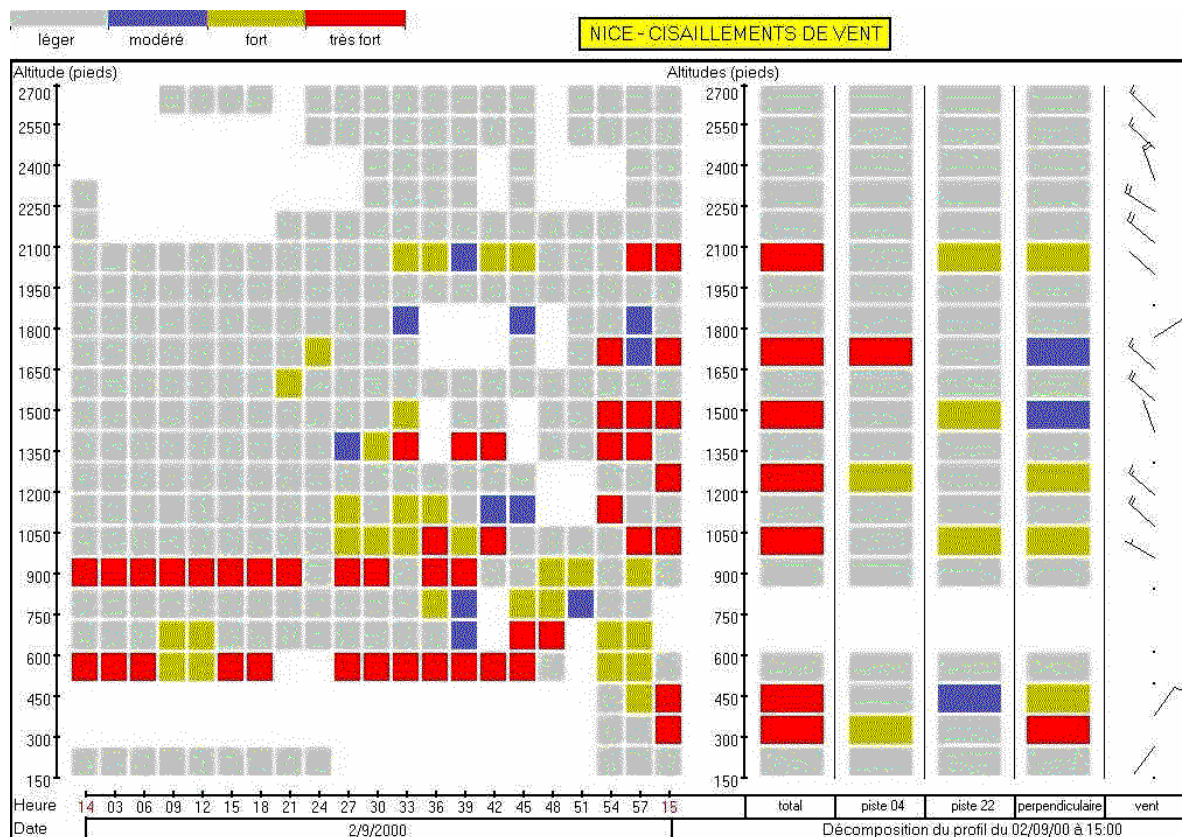


Figura A5-1. Visualización gráfica convenida con el centro de control de aproximación del Aeropuerto Nice Côte d'Azur para uso por los controladores de tránsito aéreo

Apéndice 6

REQUISITOS DE EQUIPO DE UN SISTEMA DE CIZALLADURA DEL VIENTO A BAJA ALTITUD

(véase 5.1.52)

Nota.— El texto que sigue se ha extraído del Código de reglamentos federales de los Estados Unidos, 14 CFR, Capítulo 1, Parte 121, y se reproduce con el permiso de la Administración Federal de Aviación.

- a) *Aviones fabricados después del 2 de enero de 1991.* Ninguna persona puede explotar un avión propulsado por turbina, fabricado después del 2 de enero de 1991, a menos que el avión esté dotado de un sistema aprobado de a bordo de aviso de cizalladura del viento y de guía de vuelo o un sistema aprobado de detección y evasión de a bordo o una combinación aprobada de tales sistemas.
- b) *Aviones fabricados antes del 3 de enero de 1991.* Salvo lo dispuesto en el apartado c) de la presente sección, después del 2 de enero de 1991, ninguna persona puede explotar un avión propulsado por turbina, fabricado antes del 3 de enero de 1991, a menos que satisfaga uno de los requisitos siguientes, según corresponda:
 - 1) Las marcas, modelos y series que se enumeran a continuación deben estar dotados de un sistema aprobado de a bordo de aviso de cizalladura del viento y de guía de vuelo o un sistema aprobado de detección y evasión de a bordo o una combinación aprobada de tales sistemas:
 - i) A-300-600;
 - ii) A-310 — todas las series;
 - iii) A-320 — todas las series;
 - iv) B-737, series 300, 400 y 500;
 - v) B-747-400;
 - vi) B-757 — todas las series;
 - vii) B-767 — todas las series;
 - viii) F-100 — todas las series;
 - ix) MD-11 — todas las series; y
 - x) la serie MD-80 dotada de una computadora digital EFIS y Honeywell-970 de guía de vuelo.

- 2) Todos los demás aviones propulsados por turbina que no se hayan enumerado deben estar dotados como requisito mínimo de un sistema aprobado de a bordo de aviso de cizalladura del viento. Dichos aviones deben estar equipados con un sistema aprobado de a bordo de detección y evasión de cizalladura del viento o una combinación aprobada de dichos sistemas.
- c) *Extensión de la fecha de cumplimiento.* Un titular de certificado puede obtener una ampliación de la fecha de cumplimiento que figura en el apartado b) de la presente sección si obtiene la aprobación de la FAA de un calendario de modificación. Para obtener dicha aprobación y seguir cumpliendo el calendario en cuestión, el titular de certificado debe tomar las medidas siguientes:
- 1) Presentar una solicitud de aprobación de un calendario de modificación antes del 1 de junio de 1990, al Gerente de la División de normas de vuelo en la región de la oficina del distrito del titular del certificado.
 - 2) Demostrar que todos los aviones del titular del certificado que deben estar equipados de conformidad con la presente sección estarán equipados para la fecha final de cumplimiento establecida para la modificación TCAS II.
 - 3) Cumplir con su calendario de modificación y presentar informes periódicos con información que sea aceptable para el Administrador. El informe inicial debe presentarse antes del 2 de enero de 1991 y los informes siguientes deben presentarse cada seis meses hasta el final del calendario. Los informes deben presentarse al inspector principal de aviónica asignado al titular del certificado.
- d) *Definiciones.* Para los fines de la presente sección, se aplican las definiciones siguientes:
- 1) *Avión propulsado por turbina* abarca, p. ej., aviones de turboreactor con soplante, turboreactor, hélice transónica y propulsada por soplante de muy elevada relación de dilución. En la definición se excluyen especialmente los aviones con turbohélice.
 - 2) Se considera que un avión está fabricado en la fecha en que los registros de aceptación de la inspección indican que el avión está completo y satisface los datos de diseño de tipo aprobado por la FAA.

[Doc. No. 25954, 55 FR 13242, 9 de abril de 1990]

Apéndice H a la Parte 121 — Simulación avanzada

En el presente apéndice se proporcionan directrices y un medio para lograr la instrucción de la tripulación de vuelo con simuladores de avión avanzados. Se describen los requisitos relativos al simulador y al sistema visual que deben satisfacerse para obtener la aprobación de ciertos tipos de instrucción con simulador. Estos requisitos se añaden a los de aprobación de simuladores en §121.407. Cada simulador que se utilice en el marco del presente apéndice debe ser aprobado como simulador de nivel B, C, o D, según corresponda.

Para obtener la aprobación del simulador por la FAA para determinado nivel, debe demostrarse lo siguiente a satisfacción del Administrador:

1. Prueba documentada del cumplimiento de los requisitos apropiados relativos al simulador, sistema visual y requisitos relativos a la instrucción adicional del presente apéndice para el nivel para el que se solicita aprobación.
2. Una evaluación del simulador para asegurar que su actuación en tierra, en vuelo y en aterrizaje corresponde al tipo de avión que se simula.
3. Una evaluación de los requisitos apropiados relativos al simulador y sistema visual al nivel para el que se solicita la aprobación.

CAMBIOS DE PROGRAMACIÓN DEL SIMULADOR

Si bien se necesita cierta flexibilidad al cambiar el programa de soportes lógicos, es esencial examinar a fondo dichos cambios para asegurar que el simulador mantenga su capacidad de reproducir las características de la aeronave en vuelo o en tierra. Por consiguiente, debe seguirse el procedimiento siguiente para permitir dichos cambios sin afectar a la aprobación de un simulador del Apéndice H:

1. Debe proporcionarse por escrito a la oficina de la FAA responsable de llevar a cabo la evaluación periódica de un simulador 21 días civiles antes de hacer cambios en el programa de soportes lógicos que puedan tener repercusiones en la dinámica en vuelo o en tierra de un simulador del Apéndice H, una lista completa de los cambios previstos, incluida la dinámica relacionada con los sistemas de movimiento y visual.
2. Si la FAA no se opone al cambio previsto en un plazo de 21 días civiles, el explotador puede hacer el cambio.
3. Los cambios que puedan afectar a la guía de ensayo de nivel B aprobada del simulador deben ensayarse, a cargo del explotador, en el simulador para determinar las repercusiones del cambio antes de la presentación a la FAA.
4. Los cambios de soporte lógico ya instalados deben resumirse y proporcionarse a la FAA. Cuando el ensayo del explotador indica una diferencia en la actuación del simulador debido al cambio, se proporcionará también un ejemplar enmendado de la página del guía de ensayo que incluya los nuevos resultados de ensayo a fin de actualizar el ejemplar de la guía de ensayo de la FAA.
5. La FAA puede examinar los datos de apoyo o verificar el simulador en vuelo o adoptar ambas medidas, para asegurar que no ha disminuido la calidad aerodinámica del simulador debido a un cambio en la programación del soporte lógico.
6. Todas las solicitudes relativas a cambios se evalúan basándose en los mismos criterios aplicados en la aprobación inicial del simulador para los niveles B, C o D.

LISTA DE EQUIPO MÍNIMO (MEL) PARA EL SIMULADOR

Debido a las estrictas tolerancias y otros requisitos aprobados respecto a los simuladores del Apéndice H, el simulador puede proporcionar una instrucción realista aun si ciertos elementos no esenciales no funcionan. Por consiguiente, un explotador puede utilizar su simulador en virtud de una MEL aprobada por el Administrador para dicho simulador. La MEL abarca componentes del simulador y en la misma se indica el tipo de instrucción o verificación que se autoriza si el componente deja de funcionar. Para lograrlo, el componente se pone en una de las categorías siguientes, junto con las observaciones aplicables al uso del componente en el programa de instrucción:

1. Ninguna instrucción o verificación.
2. Instrucción para determinadas maniobras.
3. Certificación y verificación.
4. Instrucción de vuelo orientada a las líneas aéreas (LOFT).

PROGRAMA DE INSTRUCCIÓN AVANZADA CON SIMULADOR

A fin de que un explotador pueda realizar instrucción de nivel C o D en el marco del presente apéndice, deben realizarse todas las instrucciones y verificaciones del simulador requeridas en el marco de un programa de instrucción avanzada con simulador que el Administrador haya aprobado para el explotador. Mediante dicho programa debe también asegurarse que todos los instructores e inspectores de vuelo que participan en la instrucción y verificación correspondiente al Apéndice H son sumamente calificados para proporcionar la instrucción requerida en el programa de instrucción. El programa de instrucción avanzada con simulador abarcará lo siguiente:

1. Los programas de instrucción iniciales, de transición, de perfeccionamiento y repetitivos con simulador del explotador y sus procedimientos para reestablecer la experiencia reciente con el simulador.
2. La manera en que el programa de instrucción integrará simuladores de nivel B, C y D con otros simuladores y dispositivos de instrucción para utilizar plenamente las funciones de instrucción, verificación y certificación.
3. Documentación de que cada instructor e inspector ha servido durante al menos un año en dicha función en un programa de titular de certificado aprobado o ha prestado servicio durante al menos un año como piloto al mando o segundo de a bordo en un avión del grupo en el que el piloto instruye o verifica.
4. Un procedimiento para asegurar que cada instructor e inspector participa activamente o en un programa aprobado de vuelo de línea regular como miembro de la tripulación de vuelo o un programa aprobado de observación de línea en el mismo tipo de avión para el que dicha persona instruye o verifica.
5. Un procedimiento para asegurar que se otorgue a cada instructor o inspector un mínimo de cuatro horas de instrucción cada año para que se familiarice con el programa de instrucción avanzada con simulador del explotador, o los cambios correspondientes, y destacar sus funciones respectivas en el programa. La instrucción para instructores e inspectores de vuelo con simulador abarcará políticas y procedimientos de instrucción, métodos y técnicas de instrucción, utilización de los controles del simulador (incluidos el tablero sobre el medio ambiente y el tablero indicador de problemas), limitaciones del simulador y equipo mínimo necesario para cada curso de instrucción.
6. Un programa especial de instrucción de vuelo orientada a las líneas aéreas (LOFT) para facilitar la transición del simulador al vuelo de la línea. Dicho programa LOFT consiste al menos en un curso de instrucción de cuatro horas para cada tripulación de vuelo. También contiene al menos dos tramos de vuelo representativos de la ruta del explotador. Uno de los tramos de vuelo contiene procedimientos operacionales estrictamente normales desde la maniobra de empuje en un aeropuerto hasta la llegada a otro. Otro tramo de vuelo contiene instrucción respecto a operaciones de vuelo anormales y de emergencia apropiadas.

NIVEL B**Instrucción y verificación permitidas**

1. Experiencia reciente (§121.439).
2. Despegues y aterrizajes nocturnos (parte 121, apéndice E).
3. Aterrizajes en una verificación de aptitudes sin el aterrizaje según los requisitos de la línea (§121.441).

Requisitos relativos al simulador

1. La programación aerodinámica debería incluir lo siguiente:
 - a. Efecto de tierra — p. ej., etapa previa a la toma de contacto, enderezamiento y toma de contacto. Esto exige datos sobre ascenso, resistencia al avance y momento de cabeceo en el efecto de tierra.
 - b. Reacción en tierra — reacción del avión al tomar contacto con la pista durante el aterrizaje, abarcando las deflexiones del montante, la fricción de los neumáticos y las fuerzas laterales.
 - c. Características del manejo en tierra — los mandos de dirección deben abarcar viento de costado, frenado, empuje negativo, deceleración y radio de viraje.
2. Un mínimo de sistemas de libertad de movimiento en tres ejes.
3. Guía de ensayo de maniobra de aterrizaje de nivel B para verificar los datos del simulador respecto a los datos reales del ensayo en vuelo del avión y proporcionar ensayos de actuación del simulador para aprobación inicial de nivel B.
4. Registradores de varios canales para registrar los ensayos de actuación de nivel B.

Requisitos visuales

1. Compatibilidad del sistema visual con la programación aerodinámica.
2. El tiempo de respuesta del sistema visual desde la entrada de control del piloto hasta la salida del sistema visual no será superior a 300 milisegundos más que el movimiento del avión a una entrada similar. El tiempo de respuesta del sistema visual se define como el examen completo de la presentación visual del primer campo vídeo que contiene información diferente procedente de una entrada de control abrupta.
3. Un medio para registrar el tiempo de respuesta visual para fines de comparación con los datos del avión.
4. Indicios visuales para evaluar la percepción de la velocidad y profundidad de la caída durante los aterrizajes.
5. Correlación entre la escena visual y los instrumentos para excluir demoras perceptibles.

NIVEL C**Instrucción y verificación permitidas**

1. Para todos los pilotos, instrucción de transición entre aviones del mismo grupo, y para el piloto al mando, verificación de certificación exigida en §61.153(g) del presente capítulo.
2. Instrucción de ascenso a la categoría de piloto al mando y verificación de la certificación cuando el piloto:
 - a. haya logrado anteriormente la calificación de segundo de a bordo con el equipo para el que el piloto recibe instrucción de ascenso de categoría;
 - b. tiene al menos 500 horas de tiempo real de vuelo como segundo de a bordo en un avión del mismo grupo; y
 - c. desempeña actualmente las funciones de segundo de a bordo en un avión del mismo grupo.
3. Instrucción inicial para piloto al mando y verificación de certificación cuando el piloto:
 - a. desempeña actualmente las funciones de segundo de a bordo en un avión del mismo grupo;
 - b. tiene un mínimo de 2 500 horas de vuelo como segundo de a bordo en un avión del mismo grupo; y
 - c. ha desempeñado las funciones de segundo de a bordo en al menos dos aviones del mismo grupo.
4. Para todos los candidatos a segundo de a bordo que satisfacen los requisitos en materia de experiencia aeronáutica según §61.159 del presente capítulo para ese avión, la instrucción y verificación iniciales y de perfeccionamiento exigidos en la presente parte y los requisitos de verificación de la certificación en §61.153 del presente capítulo.

Requisitos en materia de simulador

1. Dinámicas representativas de viento de costado y cizalladura del viento tridimensional basándose en datos relacionados con los aviones.
2. Fuerzas representativas de frenado y de control direccional para al menos las siguientes condiciones en la pista basándose en datos relacionados con los aviones:
 - a. Seco.
 - b. Húmedo.
 - c. Engelado.
 - d. Húmedo por placas.
 - e. Engelado por placas.
 - f. Húmedo sobre residuos de gomas en la zona de toma de contacto.

3. Dinámicas representativas de fallas de frenos y neumáticos (incluida la acción antiderrapante) y eficacia de frenado reducida debido a temperaturas elevadas de los frenos basándose en datos relacionados con las aeronaves.
4. Un sistema de movimiento que proporcione indicios de movimiento iguales o superiores a los que se obtienen con un sistema de libertad de movimientos en seis ejes.
5. Sistemas principales de navegación operacionales, incluidos sistemas electrónicos de instrumentos de vuelo, INS y OMEGA, si corresponde.
6. Medios para ensayar rápida y eficazmente la programación del simulador y su soporte físico.
7. Una mayor capacidad, precisión, resolución y respuesta dinámica de la computadora del simulador para satisfacer las exigencias de nivel C. Se necesita una resolución equivalente al menos a la de una computadora con longitud de palabras de 32 bits para los programas aerodinámicos críticos.
8. Actualización oportuna permanente del soporte físico y la programación del simulador según las modificaciones de los aviones.
9. Sonido de precipitación y ruidos significativos del avión perceptibles para el piloto durante operaciones normales y sonido del impacto cuando el simulador se aterriza sobrepasando los límites del tren de aterrizaje.
10. Las dinámicas de sensación de control de la aeronave reproducirán el avión simulado. Esto se determinará comparando un registro de las dinámicas de sensación de control del simulador con las mediciones del avión en las configuraciones de despegue, vuelo de crucero y aterrizaje.
11. Las respuestas relativas del sistema de movimiento, sistema visual e instrumentos del puesto de pilotaje se juntarán para proporcionar indicios integrados para los sentidos. Dichos sistemas responderán a mandos abruptos de cabeceo, balanceo y guiñada en los puestos del piloto dentro de 150 milisegundos del tiempo, pero no antes del momento en que el avión respondería en las mismas condiciones. Los cambios de escena visual a partir de la perturbación del estado constante no ocurrirá antes de que se inicie el movimiento resultante, pero dentro de la tolerancia de respuesta dinámica del sistema de 150 milisegundos. El ensayo para determinar el cumplimiento de dichos requisitos abarcará simultáneamente el registro de la salida análoga de la palanca de mando y el timón de dirección del piloto, la salida de un acelerómetro conectado a la plataforma del sistema de movimiento, situado en un emplazamiento aceptable cerca del asiento de los pilotos, la señal de salida de la presentación del sistema visual (incluidas las demoras análogas del sistema visual) y la señal de salida del indicador de actitud del piloto o un ensayo equivalente aprobado por el Administrador. Los resultados de los ensayos en una comparación del registro de la respuesta del simulador a los datos de respuesta reales del avión en las configuraciones de despegue, vuelo de crucero y aterrizaje.

Requisitos visuales

1. Escenas visuales de crepúsculo y noche con al menos tres representaciones de aeropuertos concretos, incluida la capacidad de un mínimo de diez niveles de intermitencia de la luz, características generales del terreno y puntos de referencia significativos.
2. Ayudas para la radionavegación debidamente orientadas respecto al trazado de la pista del aeropuerto.
3. Procedimientos de ensayo para confirmar rápidamente el color, RVR, foco, intensidad, horizonte estable y actitud del sistema visual, en comparación con el indicador de actitud del simulador.

4. Para la fase de aproximación y aterrizaje del vuelo, a una altitud de 2 000 pies por encima del aeropuerto y por debajo de la misma y dentro de un radio de 10 millas del aeropuerto, representaciones meteorológicas incluidas las siguientes:
 - a. Densidad de nubes variable.
 - b. Escenas terrestres parcialmente oscuras, o sea, efecto de nubes dispersas.
 - c. Disipación gradual.
 - d. Niebla en bancos.
 - e. Efecto de la niebla en la iluminación del aeropuerto.
 - f. Condiciones meteorológicas de Categorías II y III.
5. Campo visual continuo mínimo de 75° horizontales y 30° verticales por asiento de piloto. Habrá casos de visibilidad limitada únicamente como sucederían en el avión simulado o lo exija el soporte físico del sistema visual. Deben poder funcionar simultáneamente los sistemas visuales de ambos asientos de piloto.
6. Capacidad para presentar los peligros en tierra y el aire, tales como otro avión que cruza la pista en uso o tráfico convergente en vuelo.

NIVEL D

Instrucción y verificación permitidas

Salvo en lo que atañe a los requisitos enumerados en la frase siguiente, la totalidad de la instrucción y verificación de vuelo para el piloto requerida en la presente parte y los requisitos de verificación de certificación en §61.153(g) del presente capítulo. La verificación de ruta requerida en §121.440, los requisitos de avión estático del Apéndice E y los requisitos en materia de experiencia operacional en §121.434 de la presente parte deben seguir llevándose a cabo en el avión.

Requisitos relativos al simulador

1. Los movimientos característicos con sacudidas causados por la operación del avión (p. ej., sacudidas a alta velocidad, tren de aterrizaje desplegado, flaps, arrastre de la rueda de proa, pérdida) que pueden percibirse en el puesto de pilotaje. El simulador debe estar programado y tener instrumentos de modo que los modos de sacudidas características puedan medirse y compararse con los datos del avión. Se necesitan también los datos del avión para definir los movimientos en el puesto de pilotaje cuando el avión se somete a turbulencia atmosférica, como la causada por aire turbulento y turbulencia con sacudidas. Se aceptan modelos de perturbación para fines generales que se acerquen a los datos demostrables de ensayos en vuelo.
2. Establecimiento de modelos aerodinámicos para aeronaves para las cuales se expide un certificado de tipo original después del 1 de junio de 1980, incluidos baja altitud, efecto de tierra en vuelo horizontal, efecto Mach a elevada altitud, efectos del engelamiento de la célula, efecto dinámico del empuje normal

y negativo en las superficies de mando, representaciones aeroelásticas y representaciones de ausencia de linealidad debido a resbalamiento basado en los datos del ensayo en vuelo del avión proporcionados por el fabricante.

3. Amplitud y frecuencia realistas de los ruidos y sonidos en el puesto de pilotaje, los sonidos del ruido de parásitos de precipitación y del motor y la célula. Los sonidos deben coordinarse con las representaciones meteorológicas exigidas en el requisito visual núm. 3.
4. Autoensayo para el soporte físico y la programación del simulador para determinar el cumplimiento de los requisitos para simuladores de nivel B, C y D.
5. Análisis diagnóstico de los resultados impresos de las fallas del simulador que permita determinar el cumplimiento con la MEL. El explotador conservará estos resultados impresos entre las evaluaciones periódicas del simulador por la FAA, como parte del registro de anomalías diarias exigido en virtud de §121.407(a)(5).

Requisitos visuales

1. Escenas visuales diurnas, crepusculares y nocturnas con suficiente contenido para reconocer determinado aeropuerto, el terreno y los principales puntos de referencia alrededor del aeropuerto y realizar con éxito un aterrizaje visual. La escena visual diurna debe ser parte de un entorno diurno completo en el puesto de pilotaje que represente al menos la luminosidad en el puesto de pilotaje en un día de cielo cubierto. Para los fines de la presente regla, el sistema visual diurno se define como un sistema visual capaz de producir, como mínimo, plenas presentaciones de color, contenido de escenas comparable en su detalle con el que se produce con 4 000 bordes o 1 000 superficies para luz diurna y 4 000 puntos de luces para escenas nocturnas y crepusculares, lamberts de luz de 6 ft a la altura del ojo del piloto (luminosidad total), una resolución de tres minutos de arco para el campo de visión a la altura del ojo del piloto y una presentación que esté libre de cuantificación aparente u otros efectos visuales que puedan distraer mientras el simulador está en movimiento. La simulación de la iluminación ambiente del puesto de pilotaje debería ser dinámicamente conforme con la escena visual presentada. Para escenas diurnas, la iluminación ambiente no debería eliminar la escena visual presentada ni caer por debajo de lamberts de luz de 5 ft como se refleja de una planilla de aproximación a altura de la rodilla en el puesto del piloto o de lamberts de luz de 2 ft que se refleja de la cara del piloto.
2. Escenas visuales que ilustren las relaciones físicas representativas que se sabe causan ilusiones en el aterrizaje para algunos pilotos, incluidos una pista corta, el aterrizaje sobre el agua, la pendiente de la pista, características topográficas visuales y terreno que se eleva.
3. Representaciones meteorológicas visuales que abarquen los efectos sonoros, visuales y de movimiento al entrar en una precipitación ligera, media o fuerte cerca de una tormenta en el despegue, la aproximación y los aterrizajes a una altitud de 2 000 ft por encima del aeropuerto o por debajo de dicha altitud y dentro de un radio de 10 millas del aeropuerto.
4. Requisitos visuales de Nivel C en las representaciones diurnas, crepusculares y nocturnas.
5. Representaciones de pista húmeda y, si corresponde para el explotador, cubierta de nieve, incluidos los efectos en la iluminación de la pista.
6. Iluminación del aeropuerto realista en cuanto a color y capacidad de orientación.

7. Presentaciones del radar meteorológico en las aeronaves en las que la información radar aparece en los instrumentos de navegación del piloto. [Artículos 313, 601, 603 y 604 del Federal Aviation Act de 1958 enmendado (49 U.S.C. 1354, 1421, 1423, 1424); Artículo. 6(c), Department of Transportation Act (49 U.S.C. 1655(c))].

[Doc. No. 19758, 45 FR 44183, 30 de junio de 1980; 45 FR 48599, 31 de julio de 1980, enmendado por la Enmienda 121-258, 61 FR 30732, 17 de junio de 1996; 61 FR 39859, 31 de julio de 1996; Enmienda 121-267, 62 FR 68137, 30 de diciembre de 1997].

Apéndice 7

JUEGOS DE DATOS DE SIMULACIÓN DE CIZALLADURA DEL VIENTO

(véase 5.1.4.3)

Nota.— La tabla y las notas 1 a 10 se reproducen con la autorización de la FAA. La OACI ha enumerado la tabla para usarla en el presente apéndice.

Tabla A7-1. Series de datos de simulación de cizalladura del viento

Núm.	Serie de datos del sistema de simulación en el área terminal (TASS) de la NASA	Separación (metros) de la retícula horizontal [1]	Reflectividad máxima (dBz)	Reflectividad de salida (dBz)	Diámetro aproximativo de salida @ máximo_V (km)	Etapas de aumento	FBAR máximo de 1 km aprox. [2]	Presencia de lluvia [3]	Gradiente vertical de temperatura	Simetría	Modelos de ecos parásitos radar	Condiciones del vuelo Ubicación y velocidad relativa [4]
1	Accidente DFW SERIE DE DATOS/TIEMPO: 111 Microrráfaga húmeda con lluvia y granizo	50	55	35 a 42	3,5	N/A	0,2	No	Adiabático	Asimétrico	Newark 4R/22L	Alineado para despegue al este con el borde anterior de la microrráfaga a 3,0 NM del lugar en que se sueltan los frenos. Velocidad relativa: 0 ktas [5]
2	Accidente DFW SERIE DE DATOS/TIEMPO: 111 Microrráfaga húmeda con lluvia y granizo	50	55	35 a 42	3,5	N/A	0,14	No	Adiabático	Asimétrico	Newark 4R/22L	Aproximación directa –3° hacia el este con la microrráfaga situada a la altura de la radiobaliza intermedia a 1,2 NM del umbral de la pista. Velocidad relativa: 150 ktas
3	20/6/91 Vuelo de investigación de la NASA Orlando (Florida) SERIE DE DATOS/TIEMPO: 237 Microrráfaga húmeda	100	50	37 a 45	3,5	N/A	0,14	Sí	Adiabático	Irregular	Newark 4R/22L	Aproximación directa –3° hacia el sur con la microrráfaga situada a la altura de la radiobaliza intermedia a 1,2 NM del umbral de la pista. Velocidad relativa: 150 ktas

Núm.	Serie de datos del sistema de simulación en el área terminal (TASS) de la NASA	Separación (metros) de la retícula horizontal [1]	Reflectividad máxima (dBz)	Reflectividad de salida (dBz)	Diámetro aproximativo de salida @ máximo_V (km)	Etapas de aumento	FBAR máximo de 1 km aprox. [2]	Presencia de lluvia [3]	Gradiente vertical de temperatura	Simetría	Modelos de ecos parásitos radar	Condiciones del vuelo Ubicación y velocidad relativa [4]
4	20/06/91 Vuelo de investigación de la NASA Orlando (Florida) SERIE DE DATOS/TIEMPO: 237 Microrráfaga húmeda	100	50	37 a 45	3,5	Desarrollo Caso por debajo del umbral [6]	0,06	Sí	Adiabático	Irregular	Newark 4R/22L	Aproximación directa –3° hacia el este con la microrráfaga situada a la altura de la radiobaliza intermedia a 1,2 NM del umbral de la pista. Velocidad relativa: 150 ktas
5	20/6/91 Vuelo de investigación de la NASA Orlando (Florida) SERIE DE DATOS/TIEMPO: 237 Microrráfaga húmeda	100	50	37 a 45	3,5	N/A	0,19	Sí	Adiabático	Irregular	Newark 4R/22L	Procedimiento de “motor y al aire” a 100 ft hacia el oeste, con la microrráfaga a 1,8 NM del punto de 100 ft en el extremo de la pista. Velocidad relativa: 150 ktas
6	11/7/88 Caso de incidente Denver (Colorado) SERIE DE DATOS/TIEMPO: 349 Varias microrráfagas	100	35	10 a 16	3	Desarrollo Caso por debajo del umbral [6]	0,083	Ligera	Adiabático	Varía entre microrráfagas	Newark 4R/22L	Aproximación directa –3° hacia el este con la microrráfaga situada a la altura de la radiobaliza intermedia a 0,5 NM del umbral de la pista. Velocidad relativa: 150 ktas
7	11/7/88 Caso de incidente Denver (Colorado) SERIE DE DATOS/TIEMPO: 349 Varias microrráfagas	100	37	10 a 16	3	Desarrollo Caso por debajo del umbral [6]	0,13	Sí	Adiabático	Varía entre microrráfagas	Newark 4R/22L	Aproximación directa –3° hacia el norte con la microrráfaga situada a la altura de la radiobaliza intermedia a 12 NM del umbral de la pista. Velocidad relativa: 150 ktas
8	11/7/88 Caso de incidente Denver (Colorado) SERIE DE DATOS/TIEMPO: 351 Varias microrráfagas	100	24	13 a 27	1,5–3,0	Desarrollo Caso de umbral de alerta necesaria [6]	0,17	Sí	Adiabático	Varía entre microrráfagas	Newark 4R/22L	Alineado para el despegue hacia el norte con el borde anterior de la microrráfaga situado de modo que el avión esté en condiciones de viento de frente en la salida. Velocidad relativa: 0 ktas [5]

Núm.	Serie de datos del sistema de simulación en el área terminal (TASS) de la NASA	Separación (metros) de la retícula horizontal [1]	Reflectividad máxima (dBz)	Reflectividad de salida (dBz)	Diámetro aproximativo de salida @ máximo_V (km)	Etapas de aumento	FBAR máximo de 1 km aprox. [2]	Presencia de lluvia [3]	Gradiente vertical de temperatura	Simetría	Modelos de ecos parásitos radar	Condiciones del vuelo Ubicación y velocidad relativa [4]
9	11/7/88 Caso de incidente Denver (Colorado) SERIE DE DATOS/TIEMPO: 351 Varias microrráfagas	100	25	13 a 27	1,5–3,0	N/A	0,19	Sí	Adiabático	Varía entre micro-rráfagas	Newark 4R/22L	Alineado para el despegue hacia el este con el borde anterior de la microrráfaga situado de modo que el avión esté en condiciones de viento de frente en la salida. Velocidad relativa: 0 ktas [5]
10	11/7/88 Caso de incidente Denver (Colorado) SERIE DE DATOS/TIEMPO: 351 Varias microrráfagas	100	25	13 a 27	1,5–3,0	N/A	0,19	Sí	Adiabático	Varía entre micro-rráfagas	Newark 4R/22L	Despegue a la altura en que se repliega el tren de aterrizaje hacia el este con el borde anterior de la microrráfaga a 3,0 NM del momento en que se sueltan los frenos. Velocidad relativa: 150 ktas [7]
11	11/7/88 Caso de incidente Denver (Colorado) SERIE DE DATOS/TIEMPO: 351 Varias microrráfagas	100	40	13 a 27	1,5–3,0	N/A	0,15	Sí	Adiabático	Varía entre micro-rráfagas	Newark 4R/22L	Aproximación directa –3° hacia el norte con un rumbo de 360°. La microrráfaga está situada a la altura de la radiobaliza intermedia a 0,5 NM del umbral de la pista. Velocidad relativa: 150 ktas
12	11/7/88 Caso de incidente Denver (Colorado) SERIE DE DATOS/TIEMPO: 351 Varias microrráfagas	100	40	13 a 27	1,5–3,0	N/A	0,18	Sí	Adiabático	Varía entre micro-rráfagas	Newark 4R/22L	Aproximación directa –3° hacia el noreste con un rumbo de 45°. La microrráfaga está situada a la altura de la radiobaliza intermedia a 0,5 NM del umbral de la pista. Velocidad relativa: 150 ktas
13	11/7/88 Caso de incidente Denver (Colorado) SERIE DE DATOS/TIEMPO: 349 Varias microrráfagas	100	40	13 a 27	1,5–3,0	N/A	0,17	Sí	Adiabático	Varía entre micro-rráfagas	Newark 4R/22L	Aproximación directa –3° hacia el este con un rumbo de 90°. La microrráfaga está situada a la altura de la radiobaliza intermedia a 0,5 NM del umbral de la pista. Velocidad relativa: 150 ktas

Núm.	Serie de datos del sistema de simulación en el área terminal (TASS) de la NASA	Separación (metros) de la retícula horizontal [1]	Reflectividad máxima (dBz)	Reflectividad de salida (dBz)	Diámetro aproximativo de salida @ máximo_V (km)	Etapas de aumento	FBAR máximo de 1 km aprox. [2]	Presencia de lluvia [3]	Gradiente vertical de temperatura	Simetría	Modelos de ecos parásitos radar	Condiciones del vuelo Ubicación y velocidad relativa [4]
14	11/7/88 Caso de incidente Denver (Colorado) SERIE DE DATOS/TIEMPO: 351 Varias microrráfagas	100	40	13 a 27	1,5–3,0	N/A	0,13	Sí	Adiabático	Varía entre micro-rráfagas	Newark 4R/22L	Aproximación directa –3° hacia el sudeste con un rumbo de 135°. La microrráfaga está situada a la altura de la radiobaliza intermedia a 0,5 NM del umbral de la pista. Velocidad relativa: 150 ktas
15	11/7/88 Caso de incidente Denver (Colorado) SERIE DE DATOS/TIEMPO: 351 Varias microrráfagas	100	40	13 a 27	1,5–3,0	N/A	0,17	Sí	Adiabático	Varía entre micro-rráfagas	Newark 4R/22L	Aproximación directa –3° hacia el oeste con un rumbo de 270°. La microrráfaga está situada a la altura de la radiobaliza intermedia a 0,5 NM del umbral de la pista. Velocidad relativa: 150 ktas
16	11/7/88 Caso de incidente Denver (Colorado) SERIE DE DATOS/TIEMPO: 351 Varias microrráfagas	100	40	13 a 27	1,5–3,0	N/A	0,13	Sí	Adiabático	Varía entre micro-rráfagas	Newark 4R/22L	Aproximación directa –3° hacia el noroeste con un rumbo de 315°. La microrráfaga está situada a la altura de la radiobaliza intermedia a 0,5 NM del umbral de la pista. Velocidad relativa: 150 ktas
17	11/7/88 Caso de incidente Denver (Colorado) SERIE DE DATOS/TIEMPO: 351 Varias microrráfagas	100	40	13 a 27	1,5–3,0	N/A	0,15	Sí	Adiabático	Varía entre micro-rráfagas	Denver 26L	Vuelo horizontal a 1000 ft AGL, velocidad de viraje normalizada al localizador. La microrráfaga debería situarse de modo que esté directamente delante de la aeronave al captarse el localizador. Velocidad relativa: 200 ktas [8]
18	11/7/82 Inversión de temperatura Denver (Colorado) SERIE DE DATOS/TIEMPO: 436 Varias microrráfagas	50	27	0 a 10	1,0	N/A	0,23	No	Capa estable	Asimétrico	Newark 4R/22L	Alineado para el despegue hacia el este con el borde anterior de la microrráfaga situado de modo que el avión esté en condiciones de viento de frente en la salida. Velocidad relativa: 150 ktas

Núm.	Serie de datos del sistema de simulación en el área terminal (TASS) de la NASA	Separación (metros) de la retícula horizontal [1]	Reflectividad máxima (dBz)	Reflectividad de salida (dBz)	Díámetro aproximativo de salida @ máximo_V (km)	Etapas de aumento	FBAR máximo de 1 km aprox. [2]	Presencia de lluvia [3]	Gradiente vertical de temperatura	Simetría	Modelos de ecos parásitos radar	Condiciones del vuelo Ubicación y velocidad relativa [4]
19	14/7/82 Inversión de temperatura Denver (Colorado) SERIE DE DATOS/TIEMPO: 436 Varias microrráfagas	50	27	0 a 10	1,0	N/A	0,24	No	Capa estable	Asimétrico	Newark 4R/22L	Aproximación directa –3° hacia el este con la microrráfaga situada a la altura de la radiobaliza intermedia a 0,5 NM del umbral de la pista. Velocidad relativa: 150 ktas
20	14/7/82 Inversión de temperatura Denver (Colorado) SERIE DE DATOS/TIEMPO: 436 Varias microrráfagas	50	27	–10 a –4	3,0	N/A	0,24	No	Capa estable	Asimétrico	Newark 4R/22L	Aproximación directa –3° hacia el este con un ángulo de deriva de 25°. El borde anterior de la microrráfaga se sitúa en el umbral de la pista. Velocidad relativa: 120 ktas [9]
21	8/7/89 Sondeo Denver (Colorado) SERIE DE DATOS/TIEMPO: 540 Microrráfaga muy seca [10]	100	17 a 20	–10 a –4	3,0	N/A	0,18	No	Adiabático	Irregular	Newark 4R/22L	Despegue a la altura en que se repliega el tren de aterrizaje hacia el oeste con el borde anterior de la microrráfaga a 3,0 NM del momento en que se sueltan los frenos. Velocidad relativa: 150 ktas [7]
22	8/7/89 Sondeo Denver (Colorado) SERIE DE DATOS/TIEMPO: 540 Microrráfaga muy seca [10]	100	17 a 20	–10 a –4	3,0	N/A	0,16	No	Adiabático	Irregular	Newark 4R/22L	Aproximación directa –3° hacia el norte con la microrráfaga situada a la altura de la radiobaliza intermedia a 12 NM del umbral de la pista. Velocidad relativa: 150 ktas
23	8/7/89 Sondeo Denver (Colorado) SERIE DE DATOS/TIEMPO: 540 Microrráfaga muy seca [10]	100	17 a 20	–10 a –4	3,0	N/A	0,12	No	Adiabático	Irregular	Newark 4R/22L	Aproximación directa –3° hacia el norte con un ángulo de deriva de 25°. El borde anterior de la microrráfaga se sitúa en el umbral de la pista. Velocidad relativa: 120 ktas [9]

Núm.	Serie de datos del sistema de simulación en el área terminal (TASS) de la NASA	Separación (metros) de la retícula horizontal [1]	Reflectividad máxima (dBz)	Reflectividad de salida (dBz)	Diámetro aproximativo de salida @ máximo_V (km)	Etapas de aumento	FBAR máximo de 1 km aprox. [2]	Presencia de lluvia [3]	Gradiente vertical de temperatura	Simetría	Modelos de ecos parásitos radar	Condiciones del vuelo Ubicación y velocidad relativa [4]
24	8/7/89 Sondeo Denver (Colorado) SERIE DE DATOS/TIEMPO: 540 Microrráfaga muy seca [10]	100	17 a 20	-10 a -4	3,0	N/A	0,17	No	Adiabático	Irregular	Newark 4R/22L	Procedimiento de "motor y al aire" a 100 ft hacia el norte, con la microrráfaga a 1,8 NM del punto de 100 ft en el extremo de la pista. Velocidad relativa: 150 ktas
25	8/7/89 Sondeo Denver (Colorado) SERIE DE DATOS/TIEMPO: 540 Microrráfaga muy seca [10]	100	17 a 20	-10 a -4	3,0	N/A	0,16	No	Adiabático	Irregular	Denver 26L	Vuelo horizontal a 1000 ft AGL, velocidad de viraje normalizada al localizador, limitado por un ángulo de inclinación lateral de 25°. La microrráfaga debería situarse de modo que esté directamente delante de la aeronave al captarse el localizador. Velocidad relativa: 200 ktas [8]
26	8/7/89 Sondeo Denver (Colorado) SERIE DE DATOS/TIEMPO: 545 Microrráfaga extremadamente seca Segundo impulso [10]	100	5	-11	3,0	N/A	0,15	No	Adiabático	Irregular	Newark 4R/22L	Aproximación directa -3° hacia el norte con la microrráfaga situada a la altura de la radiobaliza intermedia a 0,5 NM del umbral de la pista. Velocidad relativa: 150 ktas
27	Sondeo derivado Florida SERIE DE DATOS/TIEMPO: 614 Microrráfaga sumamente asimétrica	100	50	40 a 47	1,0	N/A	0,11	Ligera	Adiabático	Asimétrica	Aero-puerto Nacional de Wash. 18	Vuelo horizontal a 1000 ft AGL, velocidad de viraje normalizada al localizador, limitado por un ángulo de inclinación lateral de 25°. La microrráfaga debería situarse de modo que esté directamente delante de la aeronave al captarse el localizador. Velocidad relativa: 200 ktas [8]

Núm.	Serie de datos del sistema de simulación en el área terminal (TASS) de la NASA	Separación (metros) de la retícula horizontal [1]	Reflectividad máxima (dBz)	Reflectividad de salida (dBz)	Diámetro aproximativo de salida @ máximo_V (km)	Etapas de aumento	FBAR máximo de 1 km aprox. [2]	Presencia de lluvia [3]	Gradiente vertical de temperatura	Simetría	Modelos de ecos parásitos radar	Condiciones del vuelo Ubicación y velocidad relativa [4]
28	Sondeo derivado Florida SERIE DE DATOS/TIEMPO: 614 Microrráfaga sumamente asimétrica	100	50	40 a 47	1,0	N/A	0,15	Ligera	Adiabático	Asimétrica	Newark 4R/22L	Aproximación directa –3° hacia el norte con un rumbo de 360°. La microrráfaga está situada a la altura de la radiobaliza intermedia a 0,5 NM del umbral de la pista. Velocidad relativa: 150 ktas
29	Sondeo derivado Florida SERIE DE DATOS/TIEMPO: 614 Microrráfaga sumamente asimétrica	100	50	40 a 47	1,0	N/A	0,17	Ligera	Adiabático	Asimétrica	Newark 4R/22L	Aproximación directa –3° hacia el norte con un rumbo de 45°. La microrráfaga está situada a la altura de la radiobaliza intermedia a 0,5 NM del umbral de la pista. Velocidad relativa: 150 ktas
30	Sondeo derivado Florida SERIE DE DATOS/TIEMPO: 614 Microrráfaga sumamente asimétrica	100	50	40 a 47	1,0	N/A	0,15	Ligera	Adiabático	Asimétrica	Newark 4R/22L	Aproximación directa –3° hacia el sur con un rumbo de 180°. La microrráfaga está situada a la altura de la radiobaliza intermedia a 0,5 NM del umbral de la pista. Velocidad relativa: 150 ktas
31	Sondeo derivado Florida SERIE DE DATOS/TIEMPO: 614 Microrráfaga sumamente asimétrica	50	50	40 a 47	1,0	N/A	0,19	Ligera	Adiabático	Asimétrica	Newark 4R/22L	Aproximación directa –3° hacia el norte con un rumbo de 225°. La microrráfaga está situada a la altura de la radiobaliza intermedia a 0,5 NM del umbral de la pista. Velocidad relativa: 150 ktas
32	Sondeo derivado Florida SERIE DE DATOS/TIEMPO: 614 Microrráfaga sumamente asimétrica	50	50	40 a 47	1,0	N/A	0,13	Ligera	Adiabático	Asimétrica	Newark 4R/22L	Aproximación directa –3° hacia el oeste con un rumbo de 270°. La microrráfaga está situada a la altura de la radiobaliza intermedia a 0,5 NM del umbral de la pista. Velocidad relativa: 150 ktas

Núm.	Serie de datos del sistema de simulación en el área terminal (TASS) de la NASA	Separación (metros) de la retícula horizontal [1]	Reflectividad máxima (dBz)	Reflectividad de salida (dBz)	Diámetro aproximativo de salida @ máximo_V (km)	Etapas de aumento	FBAR máximo de 1 km aprox. [2]	Presencia de lluvia [3]	Gradiente vertical de temperatura	Simetría	Modelos de ecos parásitos radar	Condiciones del vuelo Ubicación y velocidad relativa [4]
33	Sondeo derivado Florida SERIE DE DATOS/TIEMPO: 614 Microrráfaga sumamente asimétrica	100	50	40 a 47	1,0	N/A	0,13	Ligera	Adiabático	Asimétrica	Newark 4R/22L	Aproximación directa -3° hacia el noroeste con un rumbo de 315°. La microrráfaga está situada a la altura de la radiobaliza intermedia a 0,5 NM del umbral de la pista. Velocidad relativa: 150 ktas
34	2/8/81 Sondeo ajustado de Knowlton Montana SERIE DE DATOS/TIEMPO: 727 Frente de ráfagas	100	20 En área de FBAR máxima	18 a 20	N/A	N/A	0,12	No	Adiabático	Asimétrica	Newark 4R/22L	Alineado para el despegue hacia el oeste con el borde anterior de la microrráfaga situado de modo que el avión esté en condiciones de viento de frente en la salida. Velocidad relativa: 0 ktas [5]
35	2/8/81 Sondeo ajustado de Knowlton Montana SERIE DE DATOS/TIEMPO: 727 Frente de ráfagas	100	20 En área de FBAR máxima	18 a 20	N/A	N/A	0,13	No	Adiabático	Asimétrica	Newark 4R/22L	Aproximación directa -3° hacia el oeste. La microrráfaga está situada a la altura de la radiobaliza intermedia a 12 NM del umbral de la pista. Velocidad relativa: 150 ktas

NOTAS:

- [1] Se entregarán todas las series de datos TASS de la NASA con una resolución de 50 metros.
- [2] Los factores F serán diferentes en las series de datos elaboradas para velocidades relativas de 120, 150, y 200 ktas. Dado que el cálculo del factor F depende de manera limitada de la velocidad verdadera (TAS) del avión, una velocidad relativa característica de 150 kt se ha seleccionado para normalizar la evaluación de estos sistemas. Sin embargo, los algoritmos del sistema de cizalladura del viento pueden ser sensibles respecto a la velocidad verdadera; la velocidad relativa elevada es crítica para la evaluación del régimen de actualización del sistema en relación con un tiempo de detección mínimo y una velocidad relativa baja debería evaluarse sencillamente para indicar que el sistema funcionará realmente a bajas velocidades relativas. Por consiguiente, debe evaluarse una serie limitada a 120 y 200 ktas. Se ha seleccionado 120 ktas como mínimo característico para despegues y aterrizajes con flaps máximos de peso ligero a nivel del mar en un día normal, mientras que 200 ktas es un máximo característico para operaciones de flaps mínimos de peso elevado en aeropuertos a gran altitud en un día caluroso.
- [3] La presencia de lluvia puede afectar negativamente a la actuación del sistema. Éste debería poder detectar una cizalladura del viento peligrosa con al menos un aviso anticipado de 10 segundos para que se clasifique como un sistema de pronóstico ("de corto o largo alcance"). Dado que las cizalladuras del viento pueden estar contenidas en un entorno con lluvia fuerte, debería ser posible detectarlas en dichas condiciones.

El análisis de los datos TDWR obtenidos en Orlando ha indicado que la mayor diferencia en reflectividad observada entre dos células que producen microrráfagas a una distancia de 5 km una de la otra era de 10 dBz. En Denver, este número aumentó hasta un máximo de 30 dBz, lo que sólo se observó dos veces. Por consiguiente, para los fines de evaluación de la actuación de los sensores en presencia de lluvia, se han orientado las trayectorias de vuelo ilustradas en el Apéndice E1 cuando fue necesario, de modo que pasaran por áreas significativas de lluvia antes de llegar al peligro de las microrráfagas.

- [4] Las trayectorias de vuelo que se describen en el Apéndice E^a se han orientado, cuando fue necesario, para lograr áreas con presencia de lluvia antes de alcanzar el peligro de cizalladura del viento. Estos sistemas de detección pueden tener estrategias de observación vertical fijas o variables. Dado que el ángulo de cabeceo del avión se relaciona con el empuje excesivo, la configuración y el modo de vuelo, el sistema debería funcionar satisfactoriamente en todas las circunstancias previstas.

No sería lógico exigir que se evalúe en su totalidad la matriz de ensayos para cada configuración; por consiguiente, convendría que los fabricantes de sistemas determinaran y justificaran las condiciones críticas (relativas a detección, supresión de parásitos, presentación, etc.) para sus sistemas.

Los vuelos de compilación de ecos parásitos radar de tierra deberían efectuarse utilizando las fases y características de vuelo que se describen en el Apéndice E. Todos los ensayos en vuelo deberían realizarse utilizando ángulos de cabeceo de los sensores y del avión que sean críticos para la actuación del sistema.

- [5] Estas situaciones de vuelo tienen por objeto demostrar la detección de cizalladura del viento antes de soltarse los frenos. Si no se logra la detección en esas condiciones, debería iniciarse el recorrido de despegue y continuarse hasta el punto de detección.
- [6] Se han seleccionado trayectorias de vuelo y series de datos TASS de la NASA para proporcionar situaciones FBAR cerca del límite entre ALERTA NECESARIA y ALERTA NO NECESARIA y dentro de los criterios correspondientes a ALERTA POSIBLE para varias situaciones de microrráfagas. Dichas situaciones se han seleccionado para ilustrar las características de desarrollo, fuerza máxima y disminución de las microrráfagas.

La reflectividad, atenuación, fuerzas relativas de campo de viento vertical y horizontal, simetría del Caso 237, 349, y 614, etc., pueden cambiar a medida que se desarrolla y disminuye una microrráfaga. Estos ensayos tienen por objeto mostrar que el sistema es insensible respecto a las relaciones modeladas concretas. Los factores F para varios de estos casos se seleccionan para aproximarse al factor F ALERTA NECESARIA. Sin embargo, según el umbral escogido para la alerta, las situaciones que estén dentro de los criterios de ALERTA NECESARIA pueden no producir alerta alguna. Además, varios de esos casos tienen por objeto mostrar que el sistema está libre de falsas alertas cuando la cizalladura del viento se halla por debajo del límite de ALERTA NO NECESARIA.

- [7] La serie de simulaciones puede empezar en el despegue a la altura en que se repliega el tren de aterrizaje >50 ft AGL.
- [8] En los ensayos en vuelo relativos a datos de ecos parásitos debería tratarse de reproducir la derrota especificada ajustando el ángulo de inclinación lateral, que no debe ser inferior a 20°.
- [9] Los vuelos para compilar ecos parásitos de tierra deberían efectuarse con la aeronave en su ángulo máximo seguro de derrape a fin de simular un ángulo de deriva de 25° en la aproximación. Toda pérdida de 25° debería compensarse mediante ajustes aceptables.
- [10] Las situaciones más secas que la reflectividad básica de 5 dBz son raras. Una reflectividad de 5 dBz corresponde a 0,001 pulgadas de agua por hora en la superficie. Véase también la justificación para el caso TASS: 540 y 545 de la NASA.

a. El Apéndice E no se reproduce en el presente manual.

Apéndice 8

REGLAS DE PRONÓSTICO

Nota.— El texto que sigue se reproduce con la autorización de la Oficina Meteorológica del Reino Unido.

1. REGLAS EMPÍRICAS DE PRONÓSTICO UTILIZADAS POR LA OFICINA METEOROLÓGICA DEL REINO UNIDO DURANTE PRUEBAS EXPERIMENTALES DE PRONÓSTICO DE CIZALLADURA DEL VIENTO REALIZADAS EN 1977 QUE PUEDEN PROPORCIONAR INDICACIONES ÚTILES A OTRAS OFICINAS PARA PRUEBAS DE ESTE GÉNERO

SERVICIO DE AVISOS DE CIZALLADURA DEL VIENTO

Criterios meteorológicos

Notación: V_{10} = Viento en la superficie (10 m) (magnitud vectorial)

$V_{10} = |V_{10}|$ = Velocidad del viento en la superficie (magnitud escalar)

V_G = Viento de cizalladura (600 m o 2 000 ft) (magnitud vectorial)

$V_G = |V_G|$ = Velocidad de la cizalladura del viento (magnitud escalar)

a) Pruebas en invierno

Se debería expedir un aviso si se satisface alguno de los siguientes criterios:

- 1) $V_{10} \geq 30$ kt
- 2) $V_{10} \geq 10$ kt y $V_G - 2V_{10} \geq 25$ kt
- 3) $V_{10} \leq 10$ kt y $|V_G - V_{10}| \geq 40$ kt
- 4) $V_{10} \leq 10$ kt y $|V_G - V_{10}| \geq 30$ kt,

y si hay una capa isoterma o de inversión por debajo de 600 m

- 5) TORMENTAS a menos de 20 km o CUMULONIMBUS a menos de 10 km de la aproximación/ ascenso
- 6) ZONA FRONTAL por debajo de 600 m en la aproximación/ascenso, con

- a) un cambio del viento vectorial en el plano transversal de la zona frontal de una magnitud de por lo menos 10 kt (observado localmente o bien en una estación cercana durante el paso del frente)
 - o b) una diferencia de temperatura en el plano transversal de la zona frontal de por lo menos 5° C
 - o c) una velocidad de por lo menos 30 kt.
 - 7) Presencia supuesta de una CORRIENTE EN CHORRO A POCA ALTURA significativa por debajo de 600 m (ver reglas en el Apéndice C^a) figuran reglas por separado
 - 8) INFORMES DE AERONAVES sobre cizalladura del viento a poca altura recibidos durante la hora anterior.
- b) Pruebas en verano

Se debería expedir un aviso si se satisface alguno de los siguientes criterios:

- 1) $V_{10} \geq 30$ kt
- 2) Criterio de pruebas en invierno no utilizado en las pruebas en verano
- 3) $|V_G - V_{10}| \geq 40$ kt
- 4) $|V_G - V_{10}| \geq 30$ kt con presencia de una capa de inversión o isoterma por debajo de 600 m
- 5) hay
 - a) TORMENTAS a menos de 10 km
 - b) CUMULONIMBUS a menos de 5 km
 } Que presentan una componente de movimiento hacia la estación
- 6) hay, en la aproximación/ascenso una SUPERFICIE FRONTAL u otra DISCONTINUIDAD por debajo de 600 m, con
 - a) un cambio del viento vectorial en el plano transversal de la superficie frontal de una magnitud de por lo menos 10 kt — observado localmente o bien durante su paso por una estación cercana
 - o b) una diferencia de temperatura en el plano transversal de la zona frontal de por lo menos 5° C
 - o c) una velocidad de por lo menos 30 kt
- 7) presencia supuesta de una CORRIENTE EN CHORRO A POCA ALTURA significativa a una altura de 600 m o menos (los criterios en este caso siguen siendo los mismos que para las pruebas en invierno)
- 8) UN INFORME DE AERONAVE sobre cizalladura del viento significativa, recibido durante la hora anterior.

a. El Apéndice C no se reproduce en el presente manual.

Notas

- 1) Un aviso expedido en virtud de las Reglas 1-7 anteriores debe presentarse como sigue:
“Cizalladura del viento prevista por debajo de 2 000 ft.”
- 2) Un aviso expedido en virtud de la Regla 8 anterior debe presentarse como sigue:
“Cizalladura del viento notificada y prevista por debajo de 2 000 ft.”
- c) Criterios aplicables a la corriente en chorro a poca altura

Criterios que han de someterse a prueba a las horas de observación siguientes 2100, 0000, 0300 y 0600 GMT.

Cabe suponer la presencia de una corriente en chorro (nocturna) a baja altura si se satisfacen todos los criterios siguientes:
 - 1) La hora está comprendida entre (puesta del sol + 3 horas) y (salida del sol + 1 hora)
 - 2) Hay presente una capa de inversión o isoterma al nivel del suelo y lo ha estado durante por lo menos las tres observaciones anteriores, y

$$T_a T_a (\text{máx}) - T_a T_a \geq 10 \text{ C}$$
 - 3) $V_{10} \leq 10 \text{ kt}$ y $V_{10} (\text{máx}) \geq 10 \text{ kt}$
 - 4) $V_G \geq 10 \text{ kt}$ y $V_G (\text{puesta del sol}) \geq 10 \text{ kt}$
 - 5) No ha pasado desde las 1200 GMT ningún frente de superficie.

Notas

- 1) $V_{10} (\text{máx})$ y $T_a T_a (\text{máx})$ son los valores máximos notificados de V_{10} y $T_a T_a$ entre las 1300 y las 1800 GMT inclusive (tarde anterior).
[$T_a T_a$ es la temperatura de la superficie (en abrigo).]
- 2) Si se satisfacen todos los criterios, entonces cabe suponer la presencia de una corriente en chorro a poca altura en el transcurso de la hora presente y en las dos horas siguientes; los avisos se expedirán durante todo este período de tres horas.

**2. SERVICIO DE ALERTA DE CIZALLADURA DEL VIENTO (HWAS) ACTUAL
EN LONDRES/HEATHROW Y BELFAST/ALDERGROVE (1986) —
EXTRACTO DE LA AIP MET-07 DEL REINO UNIDO**

2.1 Los pronosticadores de la Oficina Meteorológica LONDON/Heathrow y Belfast/Aldergrove examinan las condiciones meteorológicas todas las horas y verifican los informes de aeronave sobre encuentros de cizalladura del viento en la fase de aproximación o ascenso. Cuando existe la posibilidad de cizalladura del viento a poca altura, se expide una alerta teniendo en cuenta uno o varios de los siguientes criterios:

- a) velocidad media del viento en la superficie de por lo menos 20 kt;

- b) magnitud de la diferencia vectorial entre el viento medio en la superficie y el viento de la cizalladura (una estimación del viento a 2 000 ft) de por lo menos 40 kt; y
- c) tormentas o fuertes chubascos a menos de 5 NM aproximadamente del aeropuerto.

Nota.— Se expiden también alertas teniendo en cuenta los informes recientes de los pilotos referentes a cizalladura del viento en la aproximación o el ascenso.

2.2 El mensaje de alerta se transmite en las difusiones ATIS a la llegada y la salida de Heathrow y por R/T a las aeronaves que llegan y salen en Aldergrove, en uno de los tres formatos siguientes:

- a) “CIZALLADURA DEL VIENTO PRONOSTICADA” — Cuando las condiciones meteorológicas indican que puede encontrarse cizalladura del viento a poca altura en la aproximación o el ascenso (por debajo de 2 000 ft)
- b) “CIZALLADURA DEL VIENTO PRONOSTICADA Y NOTIFICADA” — En las mismas condiciones antedichas, corroboradas por un informe de cizalladura del viento en la aproximación o el ascenso, transmitido por lo menos por una aeronave en el transcurso de la última hora.
- c) “CIZALLADURA DEL VIENTO NOTIFICADA” — Cuando una aeronave ha notificado en el transcurso de la última hora la presencia de cizalladura del viento en la aproximación o el ascenso, pero son insuficientes los indicios que corroboren la existencia de este fenómeno para expedir un pronóstico de cizalladura del viento.

2.3 Los informes sobre cizalladura del viento encontrada en la aproximación o el ascenso transmitidos por pilotos pueden mejorar considerablemente la eficacia operacional de este servicio. Los informes sirven también para la constante evaluación de los criterios en relación con los cuales se pronostican las alertas. Por consiguiente, se pide a los pilotos que encuentren durante la aproximación o el ascenso cizalladuras del viento cuya intensidad varía entre moderada y muy fuerte que notifiquen el fenómeno al ATC tan pronto como les sea posible hacerlo. Los criterios aplicables a la notificación de cizalladura del viento figuran a continuación.

Cizalladura del viento

Los pilotos que se sirvan de sistemas de navegación que proporcionen lecturas directas de la velocidad del viento, deberían notificar el viento y la altitud/altura por encima y por debajo de la capa de cizalladura, así como su ubicación. Otros pilotos deberían notificar la pérdida o ganancia de velocidad aerodinámica o la presencia de corrientes ascendentes o descendentes y todo cambio significativo en el efecto del viento de costado, la altitud/altura y ubicación, su fase de vuelo y tipo de aeronave. Los pilotos que no puedan notificar la cizalladura del viento en estos términos precisos, deberían hacerlo indicando su efecto en la aeronave, la altitud/altura y ubicación y el tipo de aeronave, por ejemplo: “Cizalladura del viento repentina a 500 ft QFE en fases finales de vuelo, necesario empuje máximo, B707”. Se pide a los pilotos que encuentren cizalladura del viento que transmitan un informe aun cuando ya se haya pronosticado o notificado previamente.

Apéndice 9

METEOROLOGÍA PARA CONTROLADORES DE TRÁNSITO AÉREO Y PILOTOS

(véase 6.3.2)

Nota.— El texto que sigue se ha extraído del Manual de instrucción, Parte F-1 — Meteorología para controladores de tránsito aéreo y pilotos (Doc 7192) de la OACI.

1. En el *Manual de instrucción*, Parte F-1 — *Meteorología para controladores de tránsito aéreo y pilotos* (Doc 7192) se actualiza la parte meteorológica del programa de estudios y se proporciona orientación para la instrucción de controladores de tránsito aéreo.
2. Los extractos siguientes provienen de las secciones pertinentes de la Parte F-1 del *Manual de instrucción* respecto a la cizalladura del viento y los conocimientos y pericia mínimos que son necesarios para que los controladores de tránsito aéreo, los pilotos privados y comerciales y los pilotos de transporte de las líneas aéreas lleven a cabo sus funciones de manera eficaz y productiva.

Capítulo 3 PROGRAMA DE ESTUDIOS

...

3.4 RELACIÓN ENTRE LA PRESIÓN Y EL VIENTO

...

3.4.2 Conocimientos y pericia requeridos

Definiciones y medición del viento

- definiciones:
 - viento
 - dirección del viento (magnética y verdadera)
 - velocidad del viento
 - velocidad vectorial del viento
 - cizalladura del viento
 - cambio del viento
 - viento levógiro
- unidades de medida
- conversiones
- métodos de medición de la velocidad vectorial del viento

Fuerzas horizontales que actúan en la atmósfera

- fuerza del gradiente de presión
- fuerza de Coriolis

- fuerza centrípeta
- rozamiento en la superficie

Viento geostrófico (incluyendo la Ley Buys-Ballot)

...

3.10 TORMENTAS

...

3.10.2 Conocimientos y pericia requeridos

...

Tiempo en la superficie asociado a tormentas

- vientos en ráfagas, turbulentos:
 - derivas del viento
- cizalladura del viento (incluidos frentes de ráfaga y microrráfagas secas y húmedas)
- precipitación fuerte (lluvia o granizo)
- cambios de la temperatura y de la presión
- rayos

Repercusiones en las operaciones de las aeronaves

- ha de evitarse volar hacia zonas tormentosas:
 - a veces no es posible situarse por encima o dejar de lado una tormenta debido a su gran amplitud
 - turbulencia fuerte (también por encima de las tormentas)
 - engelamiento fuerte
- las aeronaves que despegan y que aterrizan están influenciadas por:
 - vientos en ráfagas, turbulentos
 - cizalladura del viento (incluidos los frentes en ráfagas y las microrráfagas)
 - visibilidad reducida debido a precipitación fuerte o granizo
- efecto de los rayos en:
 - célula de la aeronave
 - brújula y radiocomunicaciones

...

3.23 SERVICIO MET PARA LA NAVEGACIÓN AÉREA INTERNACIONAL

...

3.23.2 Conocimientos y pericia requeridos

...

Organización de los servicios MET aeronáuticos en los Estados

- función de la autoridad MET
- oficinas MET (de aeródromo):
 - función
 - productos y servicios proporcionados:
- pronósticos de aeródromo, de despegue y de aterrizaje (TAF, pronósticos de tendencia) avisos de aeródromo y avisos de cizalladura del viento
- dependencia de los WAFS para la información en ruta con fines de planificación de los vuelos y para obtener la documentación de vuelo

- expedición de pronósticos en ruta para vuelos a poca altura
- exposición verbal y consultas
- presentación en pantalla de la información MET

...

3.26 PRONÓSTICOS Y AVISOS AERONÁUTICOS

...

3.26.2 Conocimientos y pericia requeridos

...

Avisos

- información SIGMET/AIRMET:
 - en ruta
 - criterios para su expedición
 - función de la información SIGMET en relación con los ciclones tropicales y las nubes de cenizas volcánicas
 - formato
- avisos de aeródromo:
 - área terminal
 - contenido
- avisos de cizalladura del viento:
 - área terminal
 - formato
- turbulencia de estela

Ejercicio de aula

- examen de mapas ordinarios y previstos para fines de planificación de los vuelos e incluidos en la documentación de vuelo
- práctica en descifrar e interpretar los pronósticos de aeródromo y los pronósticos de aterrizaje de tipo tendencia
- práctica en leer los avisos de aeródromo y los avisos de cizalladura del viento

...

Apéndice 10

AYUDAS AUDIOVISUALES QUE PUEDEN OBTENERSE DE LA OACI

(véase 6.3.5)

1. Con objeto de ayudar a los Estados y a los explotadores a elaborar sus diversos programas de instrucción, la OACI dispone de un gran número de ayudas audiovisuales para la instrucción que están a la venta. Se trata de carteles y vídeos, algunos de los cuales han sido producidos por la OACI y otros que han sido puestos a su disposición por Estados contratantes.
2. Por lo que se refiere a la cizalladura del viento, existe un cartel que trata de esta cuestión: *Frente de ráfagas, turbulencia y gradiente del viento* (P621) trata este asunto. En él se señalan los peligros que entrañan los frentes de ráfagas que acompañan a las tormentas. En el cartel P683, *Cortante del viento — Microdescendente*, se destaca que la evasión es la mejor técnica al tratarse de cizalladura del viento con microrráfaga. Existe también el cartel P686, *Microcorriente — Cortante del viento*, en que se describen e ilustran numerosas características de una cizalladura del viento con microrráfagas características. Existen dos vídeos sobre cizalladura del viento titulados *Cizalladura del viento — El presunto culpable* (V645) y *El factor del gradiente del viento* (V647).
3. Estas ayudas audiovisuales son particularmente apropiadas para las personas que siguen cursos de instrucción. En el *Catálogo de publicaciones y ayudas audiovisuales de la OACI* se proporcionan plenos detalles sobre todos los carteles y vídeos. Las solicitudes de ejemplares del catálogo o los pedidos de cualquier ayuda audiovisual para la instrucción deben dirigirse a:

Organización de Aviación Civil Internacional
A la atención de: Document Sales Unit
999 University Street
Montreal, Quebec
H3C 5H7
Tel.: +1 (514) 954-8022
Facsímile: +1 (514) 954-6769
Correo-e: sales@icao.int
Pedidos en línea: www.icao.int

Apéndice 11

PROCEDIMIENTOS SUPLEMENTARIOS B737 — CONDICIONES METEOROLÓGICAS DESFAVORABLES Y MANIOBRAS ANORMALES

(véase 6.4.6)

Nota.— El texto que sigue se ha extraído del Manual de operaciones del B737 (2002) y se reproduce con la autorización de la Boeing Company.

CIZALLADURA DEL VIENTO

Generalidades

La cizalladura del viento es un cambio de la velocidad o la dirección del viento en una corta distancia a lo largo de la trayectoria de vuelo. Se considera como fuerte la cizalladura que produce cambios de velocidad aerodinámica superiores a 15 kt o de velocidad vertical superiores a 500 ft por minuto.

Evitación

La tripulación de vuelo debería tratar de descubrir algún indicio de la presencia de cizalladura del viento a lo largo de la trayectoria de vuelo prevista. Manténgase a distancia de las células tormentosas y de precipitaciones intensas, así como de las áreas en las que se sabe que se producen cizalladuras del viento. Si hay indicios de cizalladura del viento fuerte, retarde el despegue o interrumpa su aproximación.

Puede constituir un indicio de la presencia de cizalladura del viento:

- actividad tormentosa;
- virga (lluvia que se evapora antes de llegar al suelo);
- PIREP; y
- avisos del sistema de alerta de cizalladura del viento a poca altura (LLWAS).

Prevención

Si sospecha la existencia de cizalladura del viento, esté especialmente atento a cualquier indicio de peligro y esté dispuesto a actuar ante un posible encuentro repentino.

Si se sospecha que existe cizalladura del viento, se recomienda que se tomen las medidas preventivas siguientes:

Despegue

- Utilice empuje máximo de despegue en vez de empuje reducido.
- Utilice la pista más larga apropiada.
- No utilice el director de vuelo para el despegue.
- Esté alerta a cualquier fluctuación de la velocidad aerodinámica durante el despegue y el ascenso inicial. Estas fluctuaciones pueden ser el primer indicio de cizalladura del viento.
- Conozca la actitud en cabeceo normal, con todos los motores en funcionamiento, para el ascenso inicial. Adopte una actitud a una velocidad de encabritamiento normal para todos los despegues sin falla de motor. Limite las reducciones respecto a la actitud en cabeceo para el ascenso inicial hasta que se haya logrado el margen vertical sobre el terreno y el despeje de obstáculos, a no ser que se active el sacudidor de palanca.
- Es muy importante la coordinación entre los miembros de la tripulación, así como su vigilancia. Es preciso conocer siempre lo que constituyen los valores normales de velocidad aerodinámica, actitud, velocidad vertical y velocidad adquirida. Es necesario observar atentamente los instrumentos indicadores de trayectoria de vuelo en el plano vertical, tales como variómetros y altímetros. El piloto que no esté a los mandos debería estar atento a las indicaciones de los instrumentos de trayectoria de vuelo en el plano vertical y señalar cualquier desviación respecto a la normal.
- Si la velocidad desciende por debajo de la velocidad aerodinámica de centrado, podría ser necesario forzar de manera excepcional la columna de mando para mantener la actitud en cabeceo deseada. Siempre deben tenerse en cuenta las reacciones del sacudidor de palanca.
- Si se encuentra cizalladura del viento cerca de la velocidad rotatoria VR, y la velocidad aerodinámica disminuye repentinamente, tal vez no quede suficiente recorrido de pista para volver a acelerar a la velocidad de encabritamiento inicial normal. Si no queda suficiente longitud de pista para detenerse, iníciase un encabritamiento normal a 2 000 ft por lo menos antes del extremo de la pista, incluso si es reducida la velocidad aerodinámica. Podrían ser necesarias actitudes superiores a la normal para despegar en la longitud de pista restante.

Aproximación y aterrizaje

- Seleccione la posición de flaps mínima para el aterrizaje con arreglo a la longitud del terreno.
- Agregue una corrección apropiada de velocidad relativa (del mismo modo que para una ráfaga), la velocidad de mando máxima no debería ser superior al valor más bajo entre: $V_{ref} + 20$ kt o velocidad de diseño en función de la altitud con los flaps para el aterrizaje menos 5 kt.
- Evite hacer grandes reducciones de empuje o cambios de compensación del empuje en caso de aumentos repentinos de la velocidad aerodinámica, puesto que estos aumentos pueden ir seguidos de disminución de la velocidad aerodinámica.
- Verifique los mandos del director de vuelo mediante los indicadores de trayectoria de vuelo en el plano vertical.
- Es muy importante la coordinación y vigilancia por parte de los miembros de la tripulación, especialmente de noche o en condiciones meteorológicas próximas a las mínimas. Obsérvense atentamente los instrumentos indicadores de trayectoria de vuelo en el plano vertical, tales como indicadores de velocidad vertical, altímetros e indicadores de desviación respecto a la trayectoria de planeo. El piloto que no esté a los mandos debería señalar cualquier desviación respecto a la normal. Utilizando el piloto automático y el mando automático de gases para la aproximación, puede disponerse de más tiempo para la vigilancia e inspección.

AVISOS DE CIZALLADURA DEL VIENTO

Aviso anticipado de cizalladura del viento durante el recorrido de despegue: (alerta sonora “CIZALLADURA DEL VIENTO POR DELANTE”)

- antes de V1, renunciar al despegue
- después de V1, efectuar la maniobra de evasión de cizalladura del viento.

Encuentro con cizalladura del viento durante el recorrido de despegue:

- Si hay un encuentro con cizalladura del viento antes de V1, tal vez no quede pista suficiente para detenerse si se inicia un despegue interrumpido en V1. En VR, aplicar el encabritamiento a una velocidad normal hacia una actitud de cabeceo de 15°. Una vez en el aire, efectuar la maniobra de evasión de cizalladura del viento.
- Si hay un encuentro con cizalladura del viento cerca de la velocidad normal de encabritamiento y disminuye repentinamente la velocidad relativa, tal vez no quede pista suficiente para acelerar y recuperar la velocidad normal de despegue. Si la pista no es suficiente para detenerse, iniciar un encabritamiento normal al menos 2 000 ft antes del extremo de la pista, aun con baja velocidad relativa. Pueden necesitarse actitudes más elevadas que las normales para elevarse en la pista restante. Asegurarse de que se aplica el empuje máximo.

Aviso anticipado de cizalladura del viento durante la aproximación: (alerta sonora “PROCEDIMIENTO DE MOTOR Y AL AIRE, CIZALLADURA DEL VIENTO POR DELANTE”):

- aplicar la maniobra de evasión de cizalladura del viento o, a discreción del piloto, aplicar un procedimiento normal de “motor y al aire”.

Cizalladura del viento encontrada en vuelo:

- efectuar la maniobra de evasión de cizalladura del viento.

Nota.— Los elementos siguientes indican que el avión se encuentra en cizalladura del viento:

- *aviso de cizalladura del viento (sirena de dos tonos seguida de “CIZALLADURA DEL VIENTO, CIZALLADURA DEL VIENTO”) o*
- *desviaciones inaceptables de la trayectoria de vuelo.*

Nota.— Se reconocen las desviaciones inaceptables de la trayectoria de vuelo como cambios no controlados respecto a las condiciones normales de vuelo estable por debajo de 1 000 ft AGL, que sean superiores a cualquiera de los valores siguientes:

- *velocidad relativa indicada de 15 kt*
- *velocidad vertical de 500 fpm*
- *actitud de cabeceo de 5°*
- *un desplazamiento de un punto respecto a la pendiente de planeo*
- *posición inhabitual de la palanca de empuje durante un período de tiempo significativo.*

MANIOBRA DE EVASIÓN DE LA CIZALLADURA DEL VIENTO**PILOTO A LOS MANDOS****PILOTO QUE NO ESTÁ A LOS MANDOS****Vuelo manual**

- Desconecte el piloto automático
 - Accione el conmutador TO/GA
 - Aplique enérgicamente el empuje máximo*
 - Desconecte el mando automático de gases
 - Simultáneamente gire el nivel de las alas y gire hacia una actitud inicial de cabeceo de 15°
 - Suelte los frenos aerodinámicos
 - Siga la orientación del director de vuelo TO/GA (si existe)
- Asegure un empuje máximo*
 - Verifique que se han tomado todas las medidas e indique toda omisión.

Vuelo automático

- Accione el conmutador TO/GA**
 - Verifique el anuncio del modo TO/GA
 - Verifique los avances de empuje a la potencia GA
 - Suelte los frenos aerodinámicos
 - Vigile la actuación del sistema***
 - No cambie la configuración de los flaps o el tren de aterrizaje hasta que la cizalladura del viento deje de ser un factor
 - Vigile la velocidad vertical y la altitud
 - No trate de recuperar la velocidad relativa perdida hasta que la cizalladura del viento deje de ser un factor
- Vigile la velocidad vertical y la altitud
 - Señale toda tendencia hacia el contacto con el terreno, una trayectoria de vuelo en descenso o cambios significativos en la velocidad relativa

Nota.— A medida que disminuye la velocidad relativa, aumenta la fuerza de la palanca de mando posterior. En todos los casos, la actitud de cabeceo que da lugar a intermitencia del sacudidor de palanca o de sacudidas iniciales es el límite superior de la actitud de cabeceo. Puede ser necesario el vuelo con sacudidor de palanca intermitente para obtener una separación positiva respecto al terreno. Un control ligero y constante evitará un exceso de actitud de cabeceo y la pérdida.

**Nota.— El empuje máximo significa “empuje máximo certificado”. En el caso de motores sin capacidad electrónica de limitación del empuje, la sobrealimentación o el bloqueo de la palanca de empuje debería considerarse únicamente durante situaciones de emergencia cuando se han tomado todas las demás medidas disponibles y el contacto con el terreno es inminente.*

***Nota.— Si no se cuenta con TO/GA, desconecte el piloto automático y el mando automático de gases y efectúe un vuelo manual.*

*****ADVERTENCIA.** — Una fuerte cizalladura del viento puede ser superior a la actuación del AFDS. El piloto al mando debería estar preparado para *desconectar* el piloto automático y el mando automático de gases y efectuar un vuelo manual.

BIBLIOGRAFÍA

Fujita. *The Downburst*. SMRP Research Paper No. 210. Library of Congress No. 85-50115. 1985.

Huschke (Ed.). Glossary of Meteorology. American Meteorological Society. 1959.

Kermode. Mechanics of Flight. Pitman Publishing. 1976 Edition. ISBN 0 273 31623 0.

Kraupse. Contributions on the subject of longitudinal movement of aircraft in wind shear. NASA Technical Memorandum NASA TM-77837. June 1985.

McIntosh. Meteorological Glossary. ISBN No. 11 400208 8. Her Majesty's Stationery Office. 1972.

Pettersen. Weather Analysis and Forecasting. McGraw Hill. Library of Congress No. 55-11568. 1956.

Report by the United States National Academy of Sciences Committee on Low Altitude Wind Shear and its Hazard to Aviation. National Academy Press. Washington, D.C., Library of Congress No. 83-63100.

Stewart. The Atmospheric Boundary Layer. Third WMO lecture (1979). WMO ISBN 92-63-10523-5.

Sutton. The Science of Flight. Penguin Books. 1949.

Wind Shear and Flight Safety. A select bibliography. United Kingdom Civil Aviation Authority Paper No. 86003. 1986.

— FIN —

PUBLICACIONES TÉCNICAS DE LA OACI

Este resumen explica el carácter, a la vez que describe, en términos generales, el contenido de las distintas series de publicaciones técnicas editadas por la Organización de Aviación Civil Internacional. No incluye las publicaciones especializadas que no encajan específicamente en una de las series, como por ejemplo el Catálogo de cartas aeronáuticas, o las Tablas meteorológicas para la navegación aérea internacional.

Normas y métodos recomendados internacionales. El Consejo los adopta de conformidad con los Artículos 54, 37 y 90 del Convenio sobre Aviación Civil Internacional, y por conveniencia se han designado como Anexos al citado Convenio. Para conseguir la seguridad o regularidad de la navegación aérea internacional, se considera que los Estados contratantes deben aplicar uniformemente las especificaciones de las normas internacionales. Para conseguir la seguridad, regularidad o eficiencia, también se considera conveniente que los propios Estados se ajusten a los métodos recomendados internacionales. Si se desea lograr la seguridad y regularidad de la navegación aérea internacional es esencial tener conocimiento de cualesquier diferencias que puedan existir entre los reglamentos y métodos nacionales de cada uno de los Estados y las normas internacionales. Si, por algún motivo, un Estado no puede ajustarse, en todo o en parte, a determinada norma internacional, tiene de hecho la obligación, según el Artículo 38 del Convenio, de notificar al Consejo toda diferencia o discrepancia. Las diferencias que puedan existir con un método recomendado internacional también pueden ser significativas para la seguridad de la navegación aérea, y si bien el Convenio no impone obligación alguna al respecto, el Consejo ha invitado a los Estados contratantes a que notifiquen toda diferencia además de aquellas que atañan directamente, como se deja apuntado, a las normas internacionales.

Procedimientos para los servicios de navegación aérea (PANS). El Consejo los aprueba para su aplicación mundial. Comprenden, en su mayor parte, procedimientos de operación cuyo grado de desarrollo no se estima suficiente para su adopción como normas o métodos recomendados internacionales, así como también materias de un carácter más permanente que se consideran demasiado

detalladas para su inclusión en un Anexo, o que son susceptibles de frecuentes enmiendas, por lo que los procedimientos previstos en el Convenio resultarían demasiado complejos.

Procedimientos suplementarios regionales (SUPPS). Tienen carácter similar al de los procedimientos para los servicios de navegación aérea ya que han de ser aprobados por el Consejo, pero únicamente para su aplicación en las respectivas regiones. Se publican englobados en un mismo volumen, puesto que algunos de estos procedimientos afectan a regiones con áreas comunes, o se siguen en dos o más regiones.

Las publicaciones que se indican a continuación se preparan bajo la responsabilidad del Secretario General, de acuerdo con los principios y criterios previamente aprobados por el Consejo.

Manuales técnicos. Proporcionan orientación e información más detallada sobre las normas, métodos recomendados y procedimientos internacionales para los servicios de navegación aérea, para facilitar su aplicación.

Planes de navegación aérea. Detallan las instalaciones y servicios que se requieren para los vuelos internacionales en las distintas regiones de navegación aérea establecidas por la OACI. Se preparan por decisión del Secretario General, a base de las recomendaciones formuladas por las conferencias regionales de navegación aérea y de las decisiones tomadas por el Consejo acerca de dichas recomendaciones. Los planes se enmiendan periódicamente para que reflejen todo cambio en cuanto a los requisitos, así como al estado de ejecución de las instalaciones y servicios recomendados.

Circulares de la OACI. Facilitan información especializada de interés para los Estados contratantes. Comprenden estudios de carácter técnico.

© OACI 2006
12/06, S/P1/200

Núm. de pedido 9817
Impreso en la OACI

