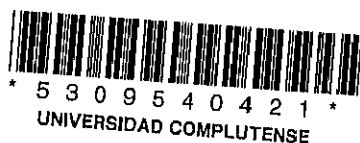


20.568

TESIS DOCTORAL



MODELIZACIÓN DINÁMICA DEL MICROBURST. APLICACIÓN A LA AERONÁUTICA



Presentada en la

FACULTAD DE CC. FÍSICAS

de la

UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID

para la obtención del

GRADO DE DOCTOR EN CC. FÍSICAS

por

LUIS PLÁGARO PASCUAL

DIRECTORES:

Dr. D. FRANCISCO VALERO RODRÍGUEZ
Dr. D. JUAN ANTONIO GARCÍA-MIGUEL

Madrid, 1995

**MODELIZACIÓN DINÁMICA DEL MICROBURST.
APLICACIÓN A LA AERONÁUTICA**

*Memoria que para optar al grado de
Doctor en CC. Físicas presenta el
licenciado en CC. Físicas*

LUIS PLAGARO PASCUAL

Madrid, Junio 1995

PRÓLOGO

Al completar los estudios y trabajos que han dado lugar a la tesis "Modelización dinámica del Microburst. Aplicación a la aeronáutica" quiero en primer lugar expresar mi más sincero agradecimiento a los profesores

Dr. D. Francisco Valero Rodríguez

Dr. D. Juan Antonio García-Miguel

por la dirección y asesoramiento que han realizado a lo largo del trabajo para poder llevarlo a buen término. Pero esto con ser muy importante, no reflejaría el esfuerzo y dedicación que han desarrollado motivando y estimulando mi ánimo para poder superar las grandes dificultades que todo trabajo tan complejo como éste lleva aparejado.

Asimismo quiero hacer constar con gran cariño mis más expresivas gracias a los compañeros del grupo de Física de la Atmósfera que están o han estado realizando sus trabajos de doctorado a lo largo de este tiempo. Personas maravillosas como Marisa, Yolanda, Rosa, Javier, Fidel, Paco y demás amigos enriquecen a los que se honran con su trato por su amistad y ayuda, sin olvidar a Alicia por su gran dedicación y paciencia en la ejecución material de este trabajo.

Hago extensivo mi agradecimiento al Departamento de Física de la Tierra, Astronomía y Astrofísica II por las facilidades prestadas en la realización de esta memoria.

Con el trabajo que se presenta en esta tesis pretendo coadyuvar

modestamente al desarrollo de la ciencia para la consecución y transmisión de los avances científicos, y abrir cauces para seguir líneas de investigación que permitan un mejor conocimiento del problema estudiado.

INDICE

INDICE

| | <u>Pág.</u> |
|---|-------------|
| Indice | 6 |
| | |
| CAPITULO 1 | |
| INTRODUCCIÓN AL FENÓMENO MICROBURST | |
| 1.- Introducción | |
| 1.1.- Problemática de la aviación | 11 |
| 1.1.1.- Cizalladura del viento | 16 |
| 1.1.2.- Efectos de la cizalladura a baja altura sobre las aeronaves | 19 |
| 1.2.- Estado del arte | |
| 1.2.1.- Investigaciones relacionadas sobre el fenómeno Microburst | 24 |
| 1.2.2.- Definición y clasificación del Microburst | 28 |
| 1.3.- Objetivos del estudio | 32 |
| | |
| CAPITULO 2 | |
| MORFOLOGÍA DEL MICROBURST | |
| 2.1.- Morfología del Microburst | |
| 2.1.1.- Estructura del Microburst aislado y simétrico | 35 |
| 2.1.2.- Líneas de Microburst | 46 |
| 2.1.3.- Análisis de la simetría del Microburst | 51 |
| 2.2.- Estudio dinámico del Microburst | 53 |
| 2.2.1.- Estudio del campo de velocidades en el Microburst desarro- llado | 58 |

| | |
|---|----|
| 2.2.2.- Transporte de energía cinética en el Microburst | 61 |
| 2.2.3.- Influencia de la temperatura en el Microburst | 64 |
| 2.2.4.- Detección del Microburst | 65 |
| 2.3.- Indicadores obtenidos | 69 |

CAPITULO 3

MODELIZACIÓN DEL FENÓMENO MICROBURST

| | |
|---|-----|
| 3.1.- Introducción. Modelo conceptual | 77 |
| 3.2.- Modelo físico | |
| 3.2.1.- Objetivos de la simulación numérica | 81 |
| 3.2.2.- Hipótesis que rigen el modelo físico | 83 |
| 3.2.3.- Ecuaciones fundamentales que gobiernan el fenómeno del Microburst | 88 |
| 3.3.- Solución del sistema de ecuaciones que rigen el fenómeno del Microburst | |
| 3.3.1.- Resolución numérica | 98 |
| 3.3.2.- Mallado espacial y temporal | 102 |
| 3.3.3.- Integración del sistema de ecuaciones. Elección del método de resolución | 105 |
| 3.3.4.- Estudio sobre las derivadas parciales espaciales | 112 |
| 3.3.5.- Determinación del paso temporal | 118 |
| 3.3.6.- Condiciones iniciales | 120 |
| 3.3.7.- Condiciones de contorno | 123 |
| 3.3.8.- Superficies de separación entre fases o sustancias distintas . | 130 |

| | |
|---|-----|
| 3.3.9.- Algoritmo utilizado en la integración con respecto a la variable tiempo | 137 |
| 3.4.- Recreación del Microburst | 141 |

CAPITULO 4

SIMULACIÓN NUMÉRICA DEL MICROBURST

| | |
|--|-----|
| 4.1.- Generalidades sobre el código utilizado | 145 |
| 4.2.- Parámetros del modelo | 147 |
| 4.3.- Análisis sobre la estabilidad y convergencia del método numérico | 150 |
| 4.4.- Análisis de sensibilidad | 152 |
| 4.5.- Presentación de resultados con el programa utilizado | 174 |

CAPITULO 5

EFFECTO DEL MICROBURST SOBRE LAS AERONAVES

| | |
|---|-----|
| 5.1.- Introducción | 194 |
| 5.2.- Objetivos de la simulación | 196 |
| 5.3.- Efecto sobre las aeronaves | 197 |
| 5.4.- Ecuaciones que determinan la trayectoria del avión | |
| 5.4.1.- Ejes de referencia | 200 |
| 5.4.2.- Velocidades del avión | 201 |
| 5.4.3.- Fuerzas y momentos exteriores que actúan sobre el avión | 203 |
| 5.4.4.- Cálculo de la trayectoria | 207 |
| 5.5.- Simulación del movimiento del avión en el interior del Microburst | |

| | |
|--|-----|
| 5.5.1.- Condiciones iniciales del avión en la simulación | 210 |
| 5.5.2.- Pérdida aerodinámica | 213 |
| 5.5.3.- Simulación Microburst-avión | 214 |

CAPITULO 6

CONCLUSIONES

| | |
|------------------------------|-----|
| 6.1.- Conclusiones | 220 |
|------------------------------|-----|

CAPITULO 7

| | |
|------------------------|-----|
| BIBLIOGRAFIA | 227 |
|------------------------|-----|

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN AL FENÓMENO DEL MICROBURST

1.- INTRODUCCIÓN

1.1.- PROBLEMÁTICA DE LA AVIACIÓN

Se puede decir que desde el comienzo de la historia de la aviación los fenómenos meteorológicos violentos suponían uno más entre los diversos peligros a que los pioneros debían enfrentarse. Con el paso de los años, y hay que hacer notar que en un período de tiempo relativamente corto, los peligros derivados de la falta de desarrollo de la tecnología aeronáutica, de la falta de preparación de los pilotos y del personal que participa en todos los aspectos de la aeronáutica y transporte aéreo, y de la carencia de convenios y normativas referidos a la seguridad de la aviación en general, han ido afortunadamente disminuyendo en gran medida.

Pero la amenaza que supone la imprevisibilidad del estado atmosférico aún permanece. Influir por parte del hombre sobre los fenómenos que se desarrollan en la atmósfera es algo que, en general, sigue estando fuera de nuestras capacidades. La predicción meteorológica en su estado de desarrollo actual sólo obtiene resultados satisfactorios al prever el estado meteorológico medio de grandes extensiones atmosféricas y solo para un período de tiempo muy corto. No se dispone de la capacidad de detectar a distancia y con precisión los cambios bruscos en el movimiento del aire, que tan importantes son para la seguridad del transporte aéreo.

Debido a ello, el porcentaje de accidentes en los que las causas meteorológicas tienen un papel relevante es muy considerable. En la bibliografía

existente al efecto se ha constatado que, de la documentación de 367 accidentes analizados que ocurrieron en las proximidades de las pistas de distintos aeropuertos entre los años 1970 y 1986, aproximadamente la cuarta parte del total fueron debidos a fenómenos meteorológicos casi todos ellos producidos por la presencia de cizalladura del viento. Un aspecto relevante a destacar es el hecho de que los accidentes ocurridos a aeronaves en fase de aproximación y aterrizaje son casi dos veces y media el número de los accidentes de aeronaves que realizaban la operación de despegue (Martin, 1988).

Estudios estadísticos realizados por el organismo encargado de la seguridad del transporte aéreo en Estados Unidos, (U.S. National Transportation Safety Board) demostraron que aproximadamente la mitad de los accidentes aéreos graves sucedidos en ese país desde el año 1975 se debían a causas meteorológicas. Datos aportados por el Comité on Science, Space and Technology (1987) determinaron por ejemplo, que durante el año 1985 los fenómenos meteorológicos adversos fueron responsables de accidentes de la aviación comercial en los que se contabilizaron 185 muertos. Asimismo la National Academy of Sciences, tomando como base los datos recogidos entre 1964 y 1982, dictaminó que el fenómeno de cizalladura del viento era el mayor causante de accidentes aéreos (Johnston, 1986). El accidente que se produjo en un aterrizaje el 24 de junio de 1974 en el aeropuerto internacional John F. Kennedy de Nueva York, fue punto de partida para que los organismos encargados de la seguridad en los aeropuertos decidieran comenzar a promover la investigación de la amenaza que supone la aparición repentina de cizalladura en las sendas de aterrizaje y despegue de los aviones y que no podía ser descubierta con los instrumentos de detección y alarma meteorológica usados

habitualmente.

Al inicio de la década de los años ochenta se produjeron en Estados Unidos otros incidentes y accidentes relacionados directamente con estos fenómenos. Uno de los casos estudiados ocurrió el 9 de julio de 1982 con un avión Boeing 727 de la compañía Pan American en el aeropuerto de Nueva Orleans, en el cual, el avión que despegaba cargado a su capacidad máxima se estrelló al encontrarse repentinamente con un fuerte viento de cola. En la investigación realizada se informó que el sistema anemométrico del aeropuerto había detectado cizalladura, pero sin que se considerase de intensidad peligrosa para el vuelo (U.S. National Transportation Safety Board, 1983). Análogamente la repentina aparición de una fuerte cizalladura, provocó que un avión Lockheed L-1011 que estaba realizando la operación de aterrizaje en el aeropuerto internacional Dallas - Fort Worth de Texas el 2 de agosto de 1985, se estrellara contra el terreno mil novecientos veinte metros antes de llegar a la cabecera de pista, saldándose el accidente con 136 muertos. El sistema de detección de cizalladura del viento no dio ninguna alarma hasta cuatro minutos después de ocurrido el accidente. (U.S. National Transportation Safety Board, 1986).

Como consecuencia de estos y otros hechos, se comenzó por iniciativa de la Federal Aviation Administration (FAA) un estudio pormenorizado sobre el fenómeno, que llevó al descubrimiento de un tipo de descendencia muy peculiar y que hasta entonces había pasado inadvertida para los meteorólogos que fue denominada ***Downburst*** (Fujita y Wakimoto, 1981). En lo que sigue se mantendrá este término debido a su aceptación por la comunidad científica.

Pero un estudio más profundo del fenómeno ha hecho conocer que dentro del mismo se enmarca una turbulencia descendente de relativamente pequeño tamaño pero de gran intensidad que se ha denominado **Microburst**. Este término podría traducirse como microexplosión, microrreventón o microrráfaga, pero como se ha generalizado el término **Microburst** seguiremos con esta denominación.

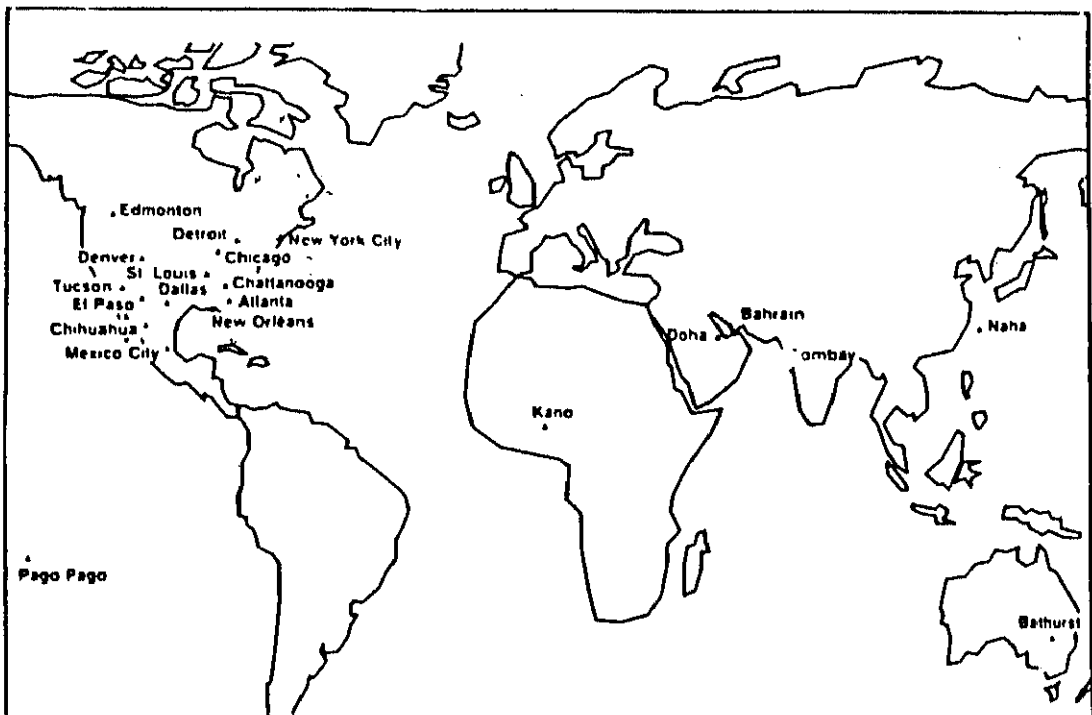


Fig. 1.1 : Representación esquemática de la ocurrencia de accidentes aéreos sucedidos hasta el año 1990 y que se ha determinado su relación con la aparición del fenómeno Microburst. La gran acumulación de sucesos que se observa en los E.E.U.U. se debe principalmente a la mayor investigación relacionada con este tema, además de la gran densidad de tráfico aéreo en dicho país.

El fenómeno del Microburst es de difícil detección pero puede crear cizalladura del viento de gran intensidad en una extensión de terreno relativamente pequeña. A la vez de los datos recogidos en otros accidentes de la misma tipología, se determinó que un gran número de accidentes sucedidos en Estados Unidos se debían a la aparición de este fenómeno. En la *Figura 1.1* se observa que el mayor número de incidentes y accidentes relacionados con el Microburst se han producido en los Estados Unidos, como resultado de la combinación de estar en una zona de gran actividad tormentosa y de existir una gran densidad de tráfico aéreo. Pero con gran probabilidad se han producido en el resto del mundo accidentes e incidentes debidos al fenómeno del Microburst que al no haberse estudiado rigurosamente no han sido asociados a esta causa. El National Aeronautics and Space Administration (1987) recomendó la investigación de los aspectos concernientes a la conceptualización, predicción y detección del fenómeno.

1.1.1.- CIZALLADURA DEL VIENTO

Se define **windshear** o cizalladura del viento como la variación por unidad de longitud del vector velocidad del viento entre dos niveles de la atmósfera. La cizalladura del viento aparece en atmósferas turbulentas en las que remolinos de aire muy irregulares son arrastrados por el viento perturbando el flujo normal de éste. Los remolinos de aire pueden girar alrededor de ejes de muy diversa orientación y la velocidad del remolino genera variaciones bruscas de la velocidad y dirección del viento.

Este viento se forma, principalmente, por las variaciones de temperatura y presión que experimentan las masas de aire, a las que hay que sumar el efecto de otros factores que lo refuerzan, tales como la fuerza de Coriolis debida a la rotación de la Tierra, y la fuerza del rozamiento con la superficie terrestre.

Los torbellinos o remolinos de aire se generan por muy diversas causas y entre ellas podemos mencionar:

- La diferencia de las fuerzas de fricción sobre el viento según sea la superficie del terreno y su configuración.
- La estructura inestable de la atmósfera que da lugar a dos tipos de turbulencia:
 - La turbulencia térmica o convectiva que va unida a la formación de cúmulos y cumulonimbos, y que por tanto, pueden detectarse

en vuelo antes de penetrar el avión en ese régimen turbulento.

- La turbulencia denominada de aire claro (CAT en notación internacional), que está muy ligada a la zona de la tropopausa y en las proximidades de la corriente del chorro.

Se pueden distinguir tres clases de cizalladura del viento según los torbellinos que las generan:

- Cizalladura horizontal del viento, que es la variación por unidad de longitud del vector velocidad del viento entre dos puntos que están a la misma altura.
- Cizalladura vertical del viento, que es la variación por unidad de longitud del vector velocidad del viento entre dos puntos situados a distinto nivel, es decir, a distinta altitud.
- Cizalladura de la componente vertical del viento, que es la variación por unidad de longitud de la componente vertical del vector velocidad del viento entre dos puntos del mismo nivel. En general, en las cercanías del suelo (menor o igual de cien metros sobre la superficie del terreno) no existe la cizalladura de la componente vertical del viento. Si ocasionalmente se presenta una corriente descendente de cierta importancia, la duración es muy breve.

La cizalladura vertical se produce en condiciones atmosféricas estables

correspondientes en general a una inversión térmica, en estos casos la velocidad máxima del viento y la máxima intensidad de la cizalladura pueden producirse a alturas muy por debajo de los sesenta metros sobre el suelo. También se produce cizalladura vertical con fuertes vientos racheados y rápidamente fluctuantes, siendo en este caso la cizalladura vertical cuatro o cinco veces más fuerte que la creada en condiciones estables.

A bajos niveles de altitud como es el caso de la aproximación al aterrizaje, predomina la cizalladura horizontal del viento que presenta mayor peligro para las aeronaves que vuelan a baja velocidad. La presencia de cizalladura horizontal de viento a bajo nivel lleva aparejada la presencia de los otros tipos de cizalladura. Por lo tanto podemos decir que la cizalladura del viento se origina por elevados gradientes de la velocidad del viento con la distancia, a lo largo de ejes perpendiculares a la dirección del viento. La detección de la cizalladura del viento a baja altitud es de gran importancia para la seguridad de las aeronaves en la zona cercana al umbral de la pista. Aun cuando los fenómenos convectivos son los que producen cizalladura más intensa, ésta también viene asociada a superficies frontales, fuertes vientos de superficie, inversión de temperatura, brisas marinas y a condiciones orográficas.

1.1.2.- EFECTOS DE LA CIZALLADURA A BAJA ALTURA SOBRE LAS AERONAVES

Las variaciones en el módulo o en la dirección de la velocidad del viento pueden hacer que cambien bruscamente el movimiento del aire alrededor de las superficies sustentadoras de un avión. El cambio brusco de un fuerte viento de cara por un viento de cola sobre un avión puede hacer que disminuya gravemente la sustentación aerodinámica o incluso se produzca la pérdida aerodinámica. El efecto sobre la estructura del avión puede ser notable, pero en ningún momento reviste caracteres catastróficos en tanto el avión está en el aire, es decir, sin chocar contra el terreno o impactar anormalmente en la pista en un aterrizaje brusco. Esto es así, ya que los criterios y procedimientos seguidos para el diseño estructural de un avión, alcanzan altos índices de seguridad como consecuencia del concepto *fail-safe* de gran capacidad de tolerancia al daño estructural.

El efecto de la cizalladura es tanto más peligrosa en cuanto que modifica repentinamente la trayectoria del avión cuando éste se encuentra cercano al suelo durante las operaciones de despegue y aterrizaje, porque es entonces cuando las aeronaves disponen de menor capacidad de maniobra para compensar los efectos de la cizalladura sobre su trayectoria. En las fases de despegue y aterrizaje el avión vuela en las cercanías del suelo y a baja velocidad. Los efectos de una brusca cizalladura pueden hacer variar muy rápidamente el ángulo de ataque de la corriente sobre el ala y por lo tanto la sustentación, con lo que una variación repentina de las fuerzas a que está sometido el avión puede provocar un accidente muy grave al hacer que cambie la trayectoria, con el riesgo de que el avión contacte con el terreno antes de que el piloto pueda tomar medidas

correctoras.

Ya se ha indicado anteriormente que el peligro es considerablemente mayor en la fase de aproximación que en la de despegue, puesto que evidentemente, en su fase de aproximación a la pista el avión está durante más tiempo volando más bajo que en la fase de despegue, con un ángulo de descenso que si ha interceptado ya la senda de planeo del ILS (Instrument Landing System), es de $3^{\circ} \pm 0,5^{\circ}$, mientras que en la fase de despegue la pendiente de subida es considerablemente mayor. Además el empuje (en aviones turbo reactores), y la potencia (en aviones propulsados por motores alternativos o turbohélices) es notoriamente mayor en la fase de despegue que en la de aproximación, y en el supuesto de un aterrizaje frustrado con obligatoriedad de irse al aire, ello exige aumentar el empuje o la potencia de la planta propulsora, lo cual siempre requiere un cierto tiempo ya que la capacidad de respuesta de los motores no es instantánea. En el caso de que la aeronave se encontrase muy cerca del suelo, ese tiempo puede ser demasiado largo para evitar el accidente.

Los aviones equipados con plantas motrices del tipo turbo reactor son más sensibles a los efectos nocivos de la cizalladura que los aviones equipados con motores alternativos en el desarrollo que venimos indicando para los vuelos a baja altura, ya que entre otras razones, el tiempo necesario para la aceleración es mayor en los turbo reactores que en los motores alternativos, pues en los primeros pueden necesitarse del orden de diez segundos para disponer de empuje máximo necesario, tiempo que puede ser insuficiente para evitar el accidente. Otra razón es que la cizalladura provoca una distribución irregular de presiones en la embocadura frontal del motor, que puede dar lugar al fenómeno de entrada

en pérdida del compresor axial.

La cizalladura aumenta su peligrosidad según lo hace su intensidad. Se ha determinado que los fenómenos que provocan cizalladura de mayor intensidad son las descendencias propias de los fenómenos tormentosos. La OMM (Organización Mundial de Meteorología) tiene publicado Atlas Internacional de Nubes en los que puede observarse que las del tipo cumulonimbo, es decir, nubes de desarrollo vertical normalmente de masa muy grande, densa y con gran contenido de agua, que son particularmente tormentosas y las más propicias a la formación de la cizalladura. Estas nubes convectivas se forman cuando el aire tiene un alto grado de humedad relativa y temperatura moderadamente alta. En ellas la convección puede producir fuertes vientos en superficie hasta más o menos los sesenta metros de altitud.

En latitudes medias como es el caso de la Península Ibérica, hay dos períodos anuales especialmente tormentosos asociados a intensa actividad baroclínica, que son al final de la primavera o comienzo del verano y al final del verano o comienzo del otoño, y que normalmente se corresponden estos períodos con la concurrencia de alta humedad relativa e inestabilidad por calentamiento. En verano normalmente no se generan estas condiciones antedichas (Font, 1983).

Los fenómenos tormentosos tiene gran probabilidad de producir descendencias que al llegar a la superficie generan ráfagas, turbonadas o chubascos (Atkinson, 1981). El Microburst es la más intensa de las ráfagas descendentes que se forma bajo este tipo de nubes convectivas. Su extrema

peligrosidad se debe entre otras a las siguientes razones:

- La cizalladura que provoca es muy intensa, de tal manera que la velocidad media de las ráfagas puede ser superior a 20 m s^{-1} con diferencias de velocidad del viento de hasta 40 m s^{-1} a bajos niveles de altitud.

- Por otro lado es un fenómeno de difícil detección ya que se diferencia de otras descendencias tormentosas en que alcanza su mayor velocidad en las proximidades del terreno, con lo que es muy difícil su detección en altura, antes de que sus efectos se dejen notar a nivel de suelo. Además el tamaño de la zona afectada por los fuertes vientos suele estar comprendida en distancias del orden de los cuatro a seis kilómetros con lo que su presencia puede incluso no ser percibida por equipos anemométricos de superficie.

- La formación del Microburst es de difícil predicción, ya que aún hoy en día no se ha logrado determinar con exactitud cuales son las condiciones atmosféricas precisas que determinan el desencadenamiento del Microburst. Se ha constatado que el Microburst puede ocurrir en cualquier condición meteorológica convectiva de tipo tormentoso, observándose que la mayor parte de las tormentas producen este fenómeno, sin embargo se han observado Microburst en lugares donde no se había identificado ninguna tormenta, particularmente en climas muy secos en los que se puede producir el fenómeno antes de que la actividad convectiva haya formado la tormenta propiamente dicha. Hay evidencias

comprobadas de que pueden generarse Microburst muy fuertes por el rápido desarrollo de tormentas convectivas, antes de que dichas tormentas puedan identificarse como tales (Hjelmfelt, 1988).

1.2.- ESTADO DEL ARTE

1.2.1.-INVESTIGACIONES RELACIONADAS SOBRE EL FENÓMENO MICROBURST

En la década de los años cincuenta, dentro del proyecto de investigación denominado Thunderstorm (Byers y Braham, 1949), se identificaron por primera vez las turbulencias descendentes como fenómenos importantes asociados a las tormentas. Se determinó que las causas del inicio del fenómeno era la convergencia producida en las capas altas de la tormenta y la presencia de ascendencias en las cercanías. Se observó que la mayoría de las descendencias se desarrollaban con velocidad continua hasta el suelo y allí se esparcían en forma de una capa de aire frío. No obstante, las mediciones efectuadas indicaban sin embargo que había descendencias de pequeño diámetro cuya velocidad aumentaba notablemente durante el descenso.

Desde 1964, cuando fue organizado el National Severe Storm Laboratory (NSSL) dependiente de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), se ha venido desarrollando un programa de estudio de los fenómenos turbulentos atmosféricos que ha servido para ir generando información publicada por la Federal Aviation Administration (FAA) sobre los métodos para soslayar o evitar las tormentas en vuelo. Pero hasta los años setenta, y como consecuencia del análisis y estudio de diversos accidentes aéreos de aviones en fase de aterrizaje o despegue, no se inició el estudio del tema de la turbulencia a baja altura. El estudio de estos accidentes llevó al descubrimiento del fenómeno del Microburst (Fujita y Caracena, 1977), realizándose numerosos estudios experimentales a lo largo de los siguientes años dentro del llamado proyecto

NIMROD (Northern Illinois Meteorological Research on Microburst, 1978).

El estudio más profundo, específico y de mayor alcance realizado para el conocimiento del fenómeno Microburst ha sido el proyecto JAWS (Joint Airport Weather Studies) desarrollado en la zona de Denver, Colorado (EE.UU), el año 1982. Se obtuvieron datos suficientes para conocer en profundidad el ciclo vital de un Microburst típico. Estos datos se utilizan para el diseño de sistemas de detección, predicción y para que los pilotos experimenten en los simuladores de vuelo situaciones del encuentro con un Microburst.

El proyecto consistió en instalar una red de observación atmosférica en una zona que, por ensayos experimentales, se consideró propicia al desarrollo del fenómeno Microburst, debido a la alta frecuencia de sucesos ocurridos en dicha área. El lugar elegido fue el aeropuerto internacional Stapleton en Denver, Colorado. El sistema de observación primario estaba compuesto por radares Doppler, radares de banda S y radares de banda C. Los datos meteorológicos a nivel del suelo se obtuvieron mediante una red de medidores meteorológicos y también se obtuvo información mediante globos sonda lanzados desde el aeropuerto con dos sondeos diarios.

La red de radares fue diseñada específicamente para recoger con gran precisión datos de la velocidad horizontal del viento a todas las alturas del fenómeno. La altura observable abarcaba desde los veinte a los ciento veinte metros sobre el terreno y el tiempo necesario para que los radares mostraran el dominio de control era de dos minutos. Debido a la corta duración del fenómeno del Microburst sólo se consiguieron datos completos de veinte casos, entre los

muchísimos más que sucedieron. Con los datos obtenidos se procedió a la representación vectorial discreta del viento, con un mallado de ciento cincuenta a trescientos metros en horizontal y de doscientos a quinientos metros en vertical, ya que era la máxima resolución que permitían los radares.

Los datos obtenidos con las estaciones meteorológicas de superficie fueron estudiados por Fujita (1985) y por Bedard y LeFebvre (1986). Posteriormente Hjelmfelt (1988) analizó los datos provenientes de los radares Doppler y a partir de ellos pudo elaborar una descripción de la estructura del fenómeno del Microburst.

Más adelante este programa de estudio se continuó en 1984 con el nombre de proyecto CLAWS (Classify, Locate and Avoid Windshear). Ambos proyectos se desarrollaron a lo largo de la época estival, puesto que en esa época es cuando con más facilidad tienen lugar el desarrollo de los fenómenos tormentosos convectivos (Mc Carthy y Wilson, 1985).

Simultáneamente a esta investigación se desarrolló otro proyecto denominado CIP (Convection Initiation Project) con el objetivo de conocer cómo se inician los procesos convectivos y poder usar esa información en la detección del Microburst (Wilson y Schreiber, 1986).

Hasta la actualidad se han continuado desarrollando programas de investigación que permitieran seguir avanzando en el conocimiento del fenómeno, tales como los proyectos LLOWS (Lincoln Laboratory Operational Weather Studies, 1985), el proyecto MIST (Microburst and Severe

Thunderstorm, 1986), el proyecto CINDE (Convective Initiation and Downburst Experiment, 1988) y otros varios. No obstante, aún queda mucho por conocer acerca de los procesos que se desarrollan durante el ciclo de vida del fenómeno para poder analizar el comportamiento y mecanismos de actuación del Microburst.

1.2.2.- DEFINICIÓN Y CLASIFICACIÓN DEL MICROBURST

Macroburst y *Microburst* son dos subdivisiones del fenómeno conocido como *Downburst* que los científicos Fujita y Wakimoto (1981) definieron de la siguiente manera: "Fuerte descendencia que produce una explosión de vientos en la superficie del terreno, capaz de provocar daños en el suelo o por encima de él". La característica que distingue el *Downburst* de otras descendencias es que éste se intensifica en su descenso de forma continua, alcanzando su máxima velocidad de descenso en las cercanías del suelo, al contrario de lo que sucede con las descendencias habituales en las tormentas, en las que este máximo se presenta a gran altura.

El *Macroburst* y el *Microburst* se diferencian en el tamaño y duración de la zona afectada por la efusión de vientos horizontales que se producen cuando la descendencia llega al suelo. Esta zona de expansión horizontal recibe el nombre de *outflow*, y mientras que en el caso del *Macroburst* el tamaño del *outflow* es mayor de cuatro kilómetros y su duración está entre diez y veinte minutos en el caso del *Microburst* el tamaño del *outflow* es menor de cuatro kilómetros y su vida media está entre dos y cinco minutos. La mayoría de los investigadores estudiosos del tema denominan *Microburst* al fenómeno completo en su conjunto incluyendo la descendencia, aunque en algunos trabajos se denomina *Microburst* solamente a la efusión de viento que se produce al llegar la descendencia al suelo y que hemos denominado *outflow*. En lo que sigue se adoptará la idea más generalizada de considerar como *Microburst* todo el desarrollo completo del fenómeno, y como tal se tratará a lo largo de la simulación.

Atendiendo a diversas características del fenómeno atmosférico en estudio, se han realizado unas clasificaciones del mismo que se enumeran a continuación.

Teniendo en cuenta la presencia o ausencia de precipitación en la superficie terrestre simultáneamente con la aparición del Microburst, Fujita (1985) clasificó los Microburst en *secos* (dry) y *húmedos* (wet). Los primeros vienen acompañados de menos de 0,25 mm. de lluvia y los otros de mayor cantidad de lluvia. Asimismo, distinguió entre Microburst de superficie y aéreos, dependiendo de que la precipitación que acompañaba al Microburst llegara a la superficie terrestre o se evaporara antes.

Atendiendo a su morfología los Microburst se pueden considerar como **individuales** o formando **líneas de Microburst**. Los primeros se caracterizan por provocar componentes de viento en todas las direcciones radialmente desde un punto central. La línea de Microburst se produce cuando dos o más Microburst existen simultáneamente y lo suficientemente cerca como para que sus corrientes interactúen entre sí. En este caso, la componente de viento es prácticamente uniforme y perpendicular a la línea de Microburst. Esta línea debe ser como mínimo de longitud doble a su anchura para que pueda ser calificada como tal. Su estructura puede ser tanto una serie de Microburst muy cercanos entre sí (línea de Microburst discreta), como una línea de divergencia casi homogénea (línea de Microburst homogénea) (Kessinger et al., 1983).

En la *Figura 1.2a* se muestra el campo de velocidades de un Microburst individual obtenido mediante radar Doppler mientras que en la *Figura 1.2b* se

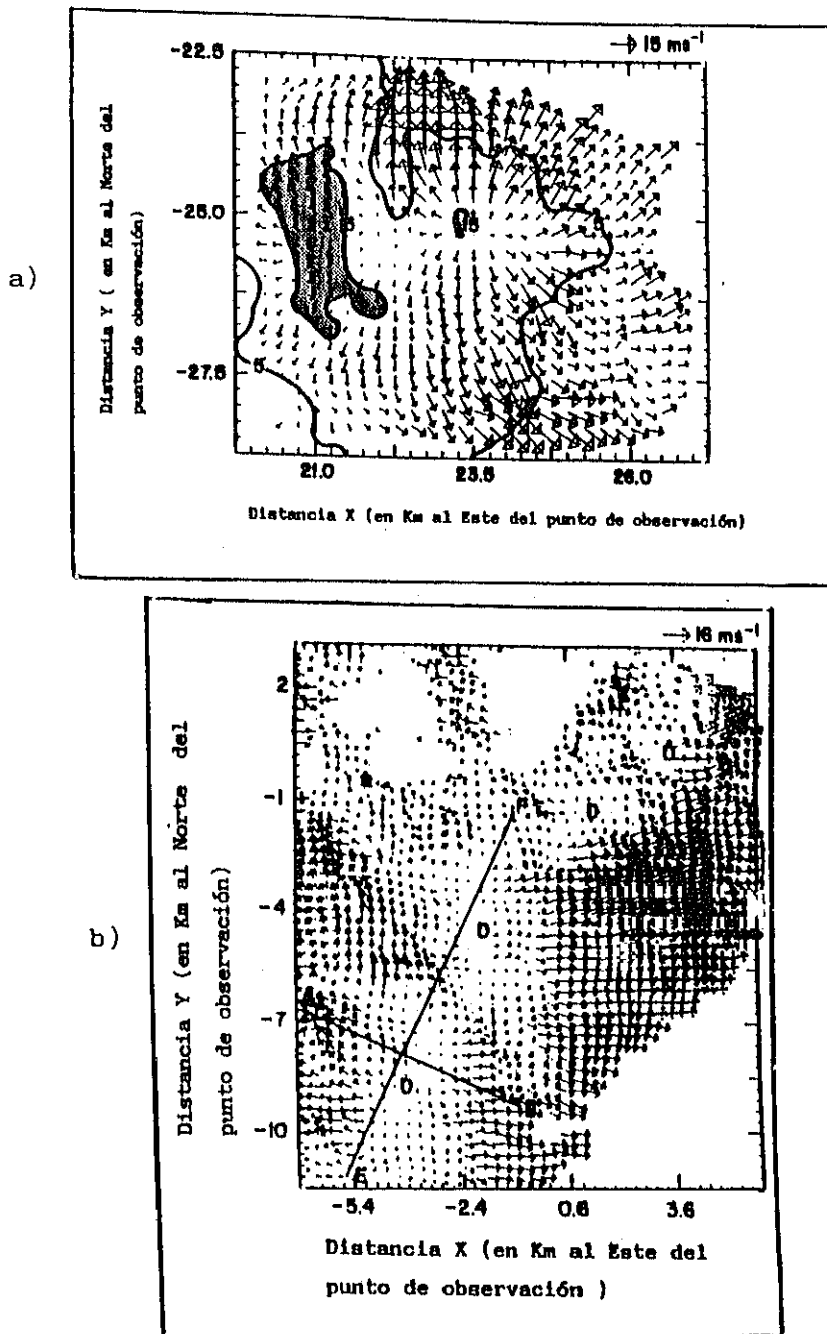


Fig. 1.2 : a) Vientos horizontales y contornos de reflectividad a 50 m de altura de un Microburst aislado detectado el 14 de Julio de 1982 en el proyecto JAWS. b) Línea de Microburst discreta detectada el 13 de Julio de 1982 en el proyecto JAWS. Los centros de los flujos descendentes que forman la línea del Microburst se indican con la letra D y se observa la divergencia continua. En la parte superior derecha se indica la escala de velocidades del viento. Los contornos de reflectividad se indican en dbZ.

representa una línea de Microburst de naturaleza discreta.

Los vientos existentes en la zona donde sucede el Microburst influyen en su morfología. En consecuencia pueden considerarse Microburst **aislados**, los que se presentan como una efusión de vientos radiando en todas las direcciones que pueden presentar una simetría radial casi total, o bien elíptica, y Microburst **contenidos** los que se presentan como una corriente direccional de gran divergencia con vientos intensos. Por regla general todos los Microburst tienden a presentar simetría radial, y las posibles irregularidades no se deben a causas internas sino a condiciones atmosféricas del entorno (Hjelmfelt, 1987).

1.3.- OBJETIVOS DEL ESTUDIO

Por todo lo expuesto hasta este momento se pretende describir detalladamente el fenómeno del Microburst, con el fin de conocer más a fondo tanto su génesis como su evolución hasta la máxima intensidad del fenómeno, y con ello analizar los aspectos que interesan a la Ciencia Meteorológica en su relación con la seguridad del transporte aéreo. Se tratará de deducir unas recomendaciones fiables que sean de utilidad para el diseño de sistemas de detección y predicción del Microburst, validándose esta información para la realización de la simulación numérica del fenómeno en estudio.

El plan de trabajo desarrollado en esta memoria se puede desglosar en las siguientes etapas u objetivos parciales, y con los contenidos que a continuación se relacionan:

a) Estudio de la morfología del fenómeno Microburst. La conceptualización del desarrollo de la estructura del fenómeno permitirá conocer en profundidad las causas de su generación y los efectos que se producen en la existencia del mismo. Esta fase del trabajo se desarrolla en el capítulo segundo.

b) Modelización del fenómeno Microburst. En el capítulo 3 de esta memoria se estudian las ecuaciones fundamentales que gobiernan el fenómeno del Microburst, estableciendo las hipótesis del modelo físico que permiten desarrollar un algoritmo cuya convergencia esté asegurada en las condiciones adecuadas.

c) La generación de un código para simulación numérica del Microburst se desarrolla en el capítulo 4, introduciendo parámetros del modelo tales como el tamaño del dominio estudiado, la duración temporal de fenómeno e intervalo del paso de integración, el estado inicial de la atmósfera, etc... todos ellos como elementos idóneos para caracterizar el Microburst.

d) Una aplicación del fenómeno meteorológico estudiado, se abordará en el análisis de los efectos del Microburst sobre la simulación del vuelo de una aeronave a través del mismo. Esta etapa se abordará en el capítulo 5.

e) Finalmente en el capítulo 6 se procederá a realizar un resumen, y establecer las conclusiones derivadas de este trabajo.

CAPÍTULO 2

MORFOLOGÍA DEL MICROBURST

2.1.- MORFOLOGÍA DEL MICROBURST

2.1.1.- ESTRUCTURA DEL MICROBURST AISLADO Y SIMÉTRICO

Como consecuencia de los experimentos realizados en los proyectos de investigación indicados anteriormente se han podido deducir los valores más frecuentes de los parámetros que definen el tamaño y la forma del Microburst. En cuanto a su duración, un Microburst típico tiene una duración de unos 14-16 minutos desde que es detectado hasta su desaparición. La divergencia aumenta en los primeros 7-8 minutos y decae a lo largo de unos 6-7 minutos tras alcanzar su máxima intensidad. La descendencia se origina cerca o en la misma base de las nubes. En este estado, el radio de la descendencia es de, aproximadamente, medio kilómetro y desciende verticalmente o con un cierto grado de inclinación dependiendo de los vientos que haya bajo la base de las nubes. En algunas ocasiones esta descendencia muestra una pequeña rotación que, en general es inconstante, no existiendo relación aparente con la altura ni con la velocidad vertical del aire.

En las *Figuras 2.1a* y *2.1b*, se muestra un desarrollo esquemático de la estructura básica del Microburst. Se indica por T el instante en que el Microburst alcanza la superficie del terreno. Al inicio del fenómeno, en $T-5$ minutos, la corriente descendente se ensancha y acelera aunque no se detecta cizalladura en su interior ni en su centro de precipitación, no existiendo valores de divergencia notables en la superficie del terreno. A continuación, en el instante $T-2$ minutos, aparecen gradientes de presión desde el suelo. Esta intensificación

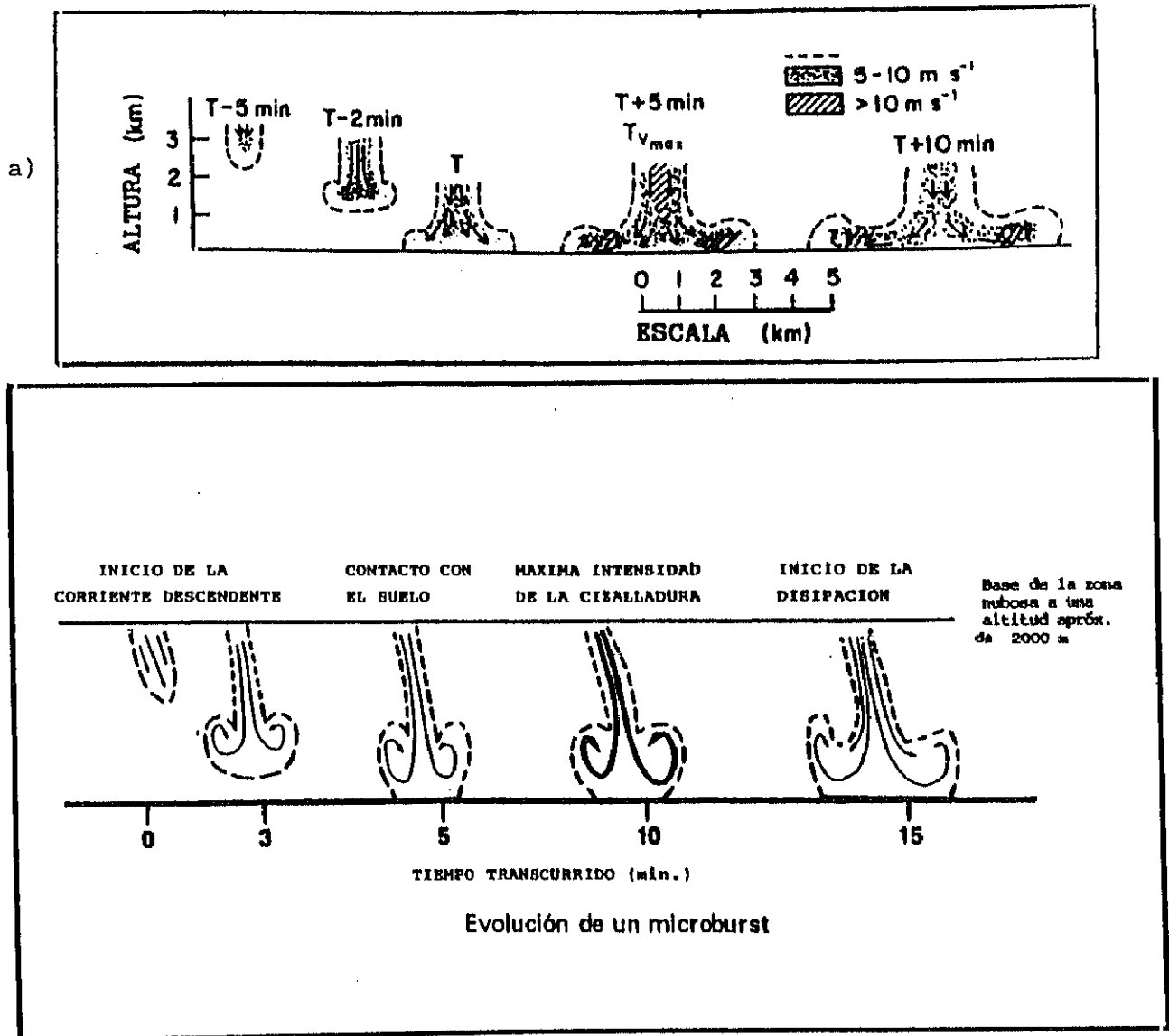


Fig. 2.1 : Morfología del Microburst. En el caso a) se muestra el desarrollo de la estructura básica del Microburst mientras en el caso b) se indica la evolución de un Microburst típico a lo largo del tiempo.

del gradiente de presión desde el suelo y en dirección vertical hacia arriba hace que la corriente descendente aumente rápidamente de anchura y desarrolle vorticidad en el borde inferior. No se detecta divergencia horizontal importante en la superficie del terreno hasta que este borde alcanza la superficie. Al llegar a la superficie la corriente empieza a esparcirse de forma similar a una corriente potencial. En este momento puede detectarse mediante radar Doppler cizalladura horizontal ya que todavía está por encima de la superficie. Generalmente esto ocurre a menos de quinientos metros de altura de la superficie del terreno y menos de un minuto antes de que se observe divergencia con instrumentos de superficie. Cuando la descendencia alcanza el suelo, la efusión del Microburst que se conoce como *outflow* empieza a desarrollarse y se crea una zona de remanso justo debajo del centro de la descendencia (Mueller y Hildebrand, 1983). Se ha verificado que el *outflow* alcanza muy pronto su altura total y la cizalladura aumenta a la vez que el *outflow* se hace más organizado. El Microburst alcanza la máxima intensidad a la vez que su mayor organización en $T+5$ minutos y la corriente presenta gran semejanza en su estructura con el fenómeno del *Wall-Jet*, es decir, con el chorro de aire que incide perpendicularmente a una superficie (Sadeh y Muckherji, 1974). Algunos Microburst muestran un segundo máximo relativo de intensidad con posterioridad al primero, lo que sugiere la posibilidad de que los Microburst tengan variaciones cíclicas de intensidad a lo largo de su desarrollo.

En el borde del *outflow* se desarrolla un rotor horizontal, que a veces no llega a formar un anillo completamente cerrado alrededor del centro de la descendencia y del cual se va alejando a la vez que el *outflow* crece de tamaño.

Un indicativo visual de que se está produciendo un Microburst puede ser el remolino de polvo levantado del suelo por este rotor. Es típico que la corriente de retorno que forma la parte superior del rotor no se produzca hasta después del instante de máxima intensidad. En general, el torbellino no aparece completamente desarrollado hasta $T+10$ minutos cuando ya la intensidad está decreciendo y el rotor se va alejando. Las observaciones experimentales indican que el rotor está mejor definido en la zona de la dirección del viento dominante.

El Microburst posteriormente puede continuar creciendo en tamaño superando la duración típica de un Microburst, englobándose entonces dentro del concepto de *Macroburst* con velocidades y cizalladura del viento decreciente. Seguidamente el Microburst decae iniciándose la disipación al hacerse más débil y menos organizado durante los siguientes minutos y perdiendo rápidamente la altura total del *outflow*, que ha mantenido prácticamente constante durante toda su vida.

Hjelmfelt (1988) recopiló datos sobre la morfología de los Microburst observados mediante radar Doppler durante los experimentos de los proyectos JAWS y CLAWS, mostrándose en la *Figura 2.2* en forma esquemática los parámetros más característicos del mismo. En los casos estudiados se obtuvieron valores medios de 24 m s^{-1} como diferencias máximas de velocidad radial, ΔV , entre puntos cuya separación media, D , es de 2500 metros, aunque se llegaron a medir valores más altos cercanos a los 42 m s^{-1} , lo que indica que se tiene una fuerte dispersión con respecto a los valores medios.

El promedio de tiempo necesario para que la corriente de aire alcance su máxima intensidad es de siete minutos y el valor medio del intervalo de tiempo transcurrido entre el instante de máxima intensidad y la desaparición del fenómeno es aproximadamente de ocho minutos, por lo que en promedio, la vida del Microburst es de 15 minutos. La altura, H , de la zona de expansión del *outflow* en los experimentos realizados es generalmente menor de 1 kilómetro y como valor medio se tiene 0.7 km. La distancia, E , entre los bordes del *outflow*

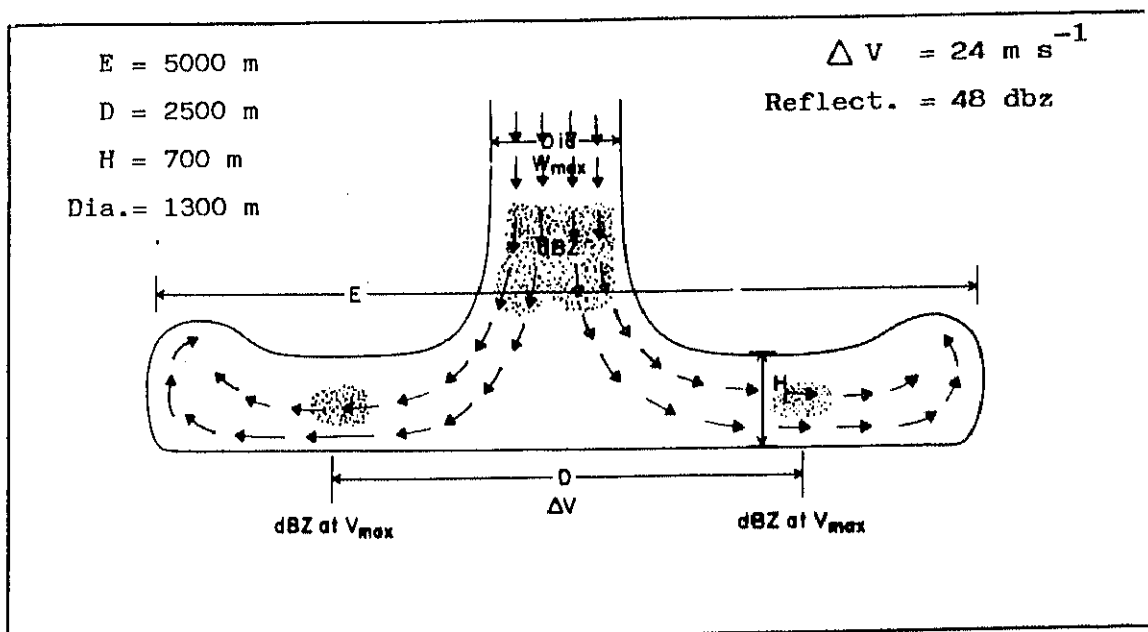


Fig. 2.2 : Representación esquemática de los parámetros más significativos del Microburst. Se indican los valores en promedio de las observaciones efectuadas en el proyecto JAWS.

es del orden del doble de la distancia, D , que se tiene entre los puntos de máxima velocidad. El diámetro de la corriente descendente, Dia , tiene valores

promedios de 1300 metros a una altura de 1700 metros sobre el terreno cuando el *outflow* ya está constituido.

Por otra parte la reflectividad en los puntos de máxima precipitación oscila entre 15 dBz y 65 dBz siendo 48 dBz el valor promedio. Sin embargo, en los puntos de máxima velocidad la reflectividad es menor, con valores medios de 30dBz. Hay gran dificultad en relacionar la reflectividad con la cizalladura para detectar el Microburst, esto hace pensar en la necesidad de utilización de radares de alta sensibilidad para estudiar Microburst producidos en ambientes secos. No se ha podido encontrar ninguna relación entre la morfología del Microburst y la intensidad de la precipitación, ni entre la reflectividad y la velocidad en los puntos de máxima variación de la velocidad.

Después de llegar a su máxima intensidad, la mitad de los Microburst estudiados continuaron expandiéndose, en tanto que otros se debilitaron sin crecimiento posterior de tamaño. El resto se agruparon en formaciones de líneas de Microburst. También se estudiaron algunos casos en los que ciertos Microburst crecieron por encima de las dimensiones del fenómeno y se convirtieron en divergencias a gran escala.

El Microburst es difícilmente detectable en altura antes de que sus efectos se dejen notar a nivel del suelo, ya que alcanza las máximas velocidades del viento en las proximidades del terreno, y el tamaño de la zona afectada por los fuertes vientos está comprendida en distancias del orden de los cuatro a seis kilómetros, por lo que su presencia puede incluso no ser percibida por equipos

anemométricos de superficie. En general, el Microburst presenta simetría radial o de tipo elíptico, y si presenta ciertas irregularidades se deben más a condiciones del entorno que a causas internas del Microburst. En la *Figura 2.3* se ilustra la estructura genérica del Microburst en el instante de máxima intensidad indicándose valores típicos de los distintos parámetros.

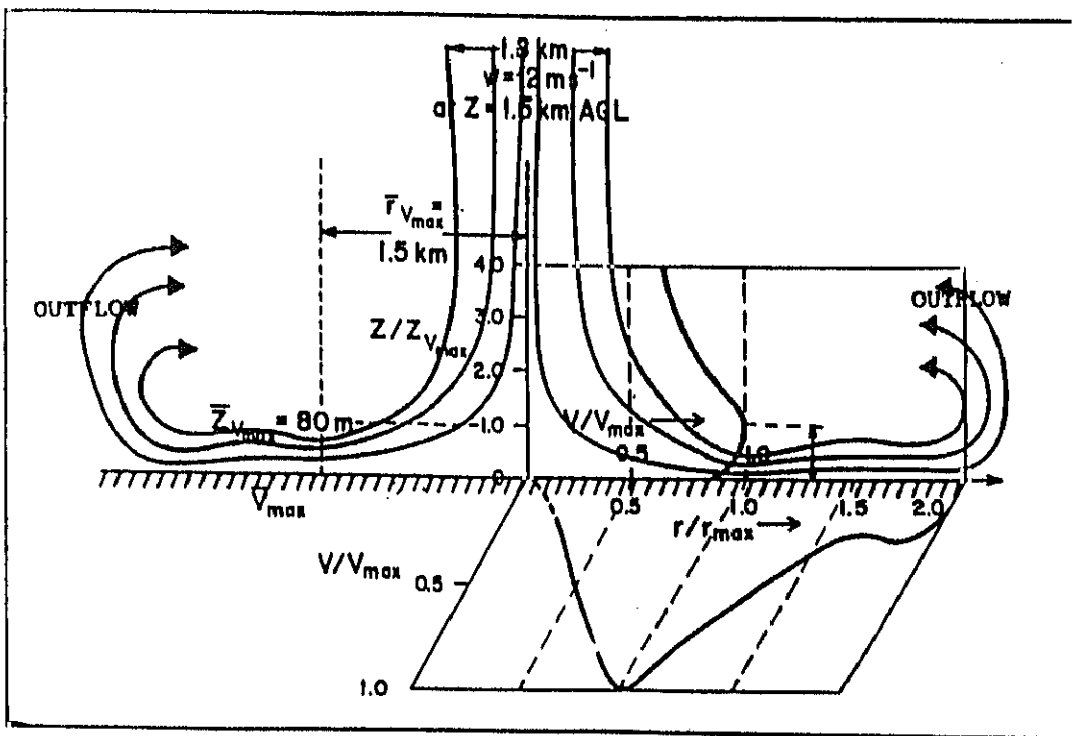


Fig. 2.3 : Esquema de la estructura del Microburst individual observado en JAWS en el instante de máxima intensidad.

El Microburst puede presentarse en cualquier condición meteorológica con fuerte actividad convectiva, aunque se han observado Microburst sin haberse identificado ninguna tormenta, particularmente en climas muy secos en los que se puede producir el fenómeno antes de que la actividad convectiva haya formado la tormenta propiamente dicha. También pueden generarse Microburst muy fuertes por el rápido desarrollo de tormentas convectivas, antes de que dichas tormentas puedan identificarse como tales.

Cuando un Microburst se desarrolla por debajo de una tormenta con fuertes vientos superficiales, deja de ser apreciable la estructura radial de la divergencia creada por el Microburst. El estudio del campo de velocidades del viento muestra una fuerte corriente direccional divergente y esta situación recibe el nombre de Microburst contenido (Hjelmfelt, 1988). La aparición de este tipo de Microburst no se debe al movimiento de la tormenta, sino a la diferencia de velocidades horizontales entre el nivel de la tormenta y el nivel del suelo. La velocidad de la tormenta sólo influye en el desplazamiento del Microburst con respecto a la superficie, pero no tiene influencia sobre su estructura. En este caso, las observaciones indican que el eje de precipitación aparece curvado desde la base de las nubes hasta el suelo. Esto indica una fuerte cizalladura del viento bajo el nivel de las nubes. Cuando la precipitación cae en esa zona, modifica la dirección de su velocidad para adaptarse a la del entorno y en consecuencia la descendencia del Microburst también se inclina.

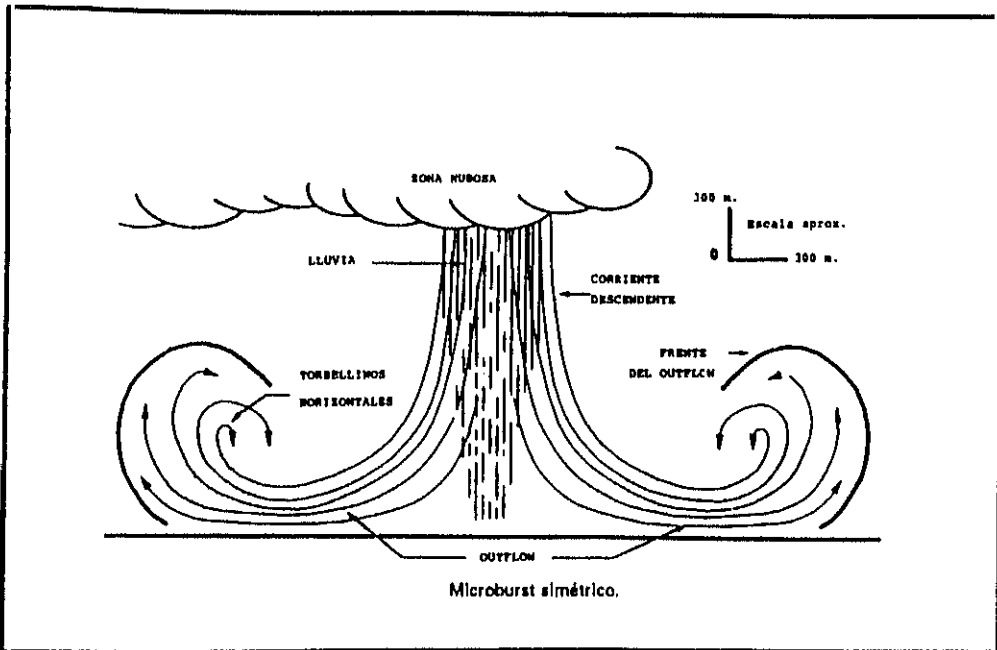
Por otra parte, si se analiza el campo de velocidad horizontal de un Microburst y se descompone en la suma de otros dos, uno de valor constante

que se corresponde con la velocidad media en la región, y otro de anomalías regionales obtenido con la diferencia de velocidades entre la media de la región y la del punto concreto, se observa en este punto la divergencia radial del Microburst claramente definida (Hjelmfelt, 1987).

Si el Microburst se produce en una zona con vientos superficiales no demasiado intensos presenta, de forma aproximada, la estructura radial de un Microburst aislado, aunque la tormenta se desplace con velocidades de hasta 10 m s^{-1} . Cuanto más intenso es el viento, más se manifiesta el Microburst como una fuerte divergencia direccional y más difícil es su detección. Esto puede indicar que un Microburst contenido en una corriente se puede estudiar como la superposición de un Microburst aislado y de la corriente básica, lo cual es muy interesante con vistas al diseño de sistemas de detección de este tipo de Microburst (Hjelmfelt, 1988).

En los experimentos realizados durante el proyecto JAWS pueden distinguirse Microburst con flujo externo simétrico o asimétrico. En el primer caso, *Figura 2.4a*, la corriente descendente aparece en una zona donde se produce precipitación sin existencia de vientos superficiales, con lo que el aire tiene un alto grado de humedad relativa. Si la precipitación en su descenso puede llegar a capas de la atmósfera con menor humedad relativa, vuelve a evaporarse continuando el proceso descendente. En un Microburst de tipo asimétrico, *Figura 2.4b*, producido por corrientes horizontales de viento, el eje del Microburst se inclina y el desarrollo del *outflow* a ambos lados tiene distinta intensidad. En la *Figura 2.5* se representa la estructura tridimensionalizada del

a)



b)

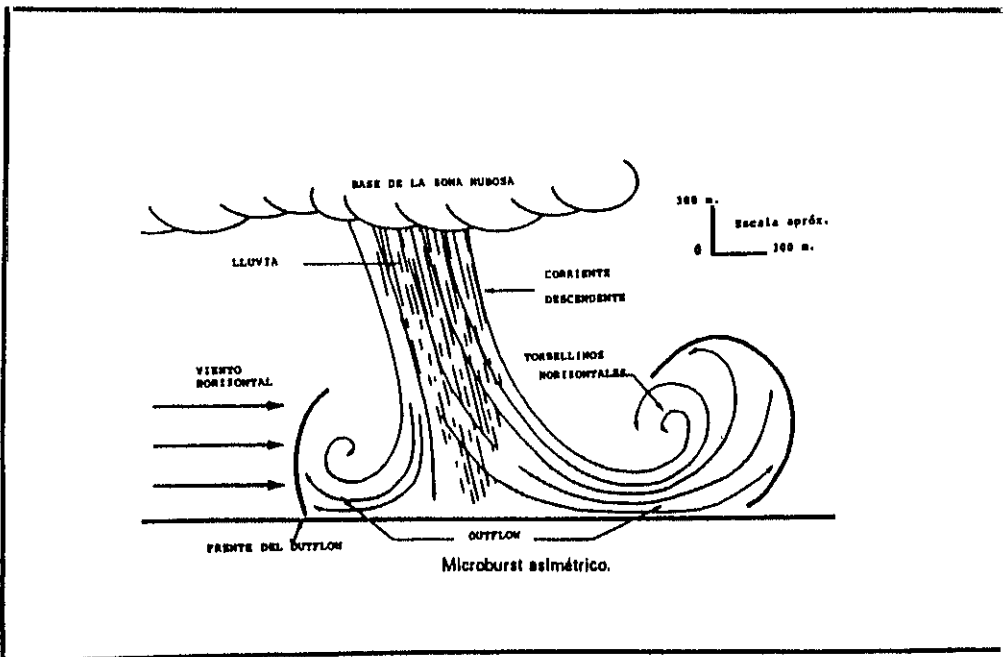


Fig. 2.4 : a) Microburst con flujo externo simétrico.
b) Microburst con flujo externo asimétrico.

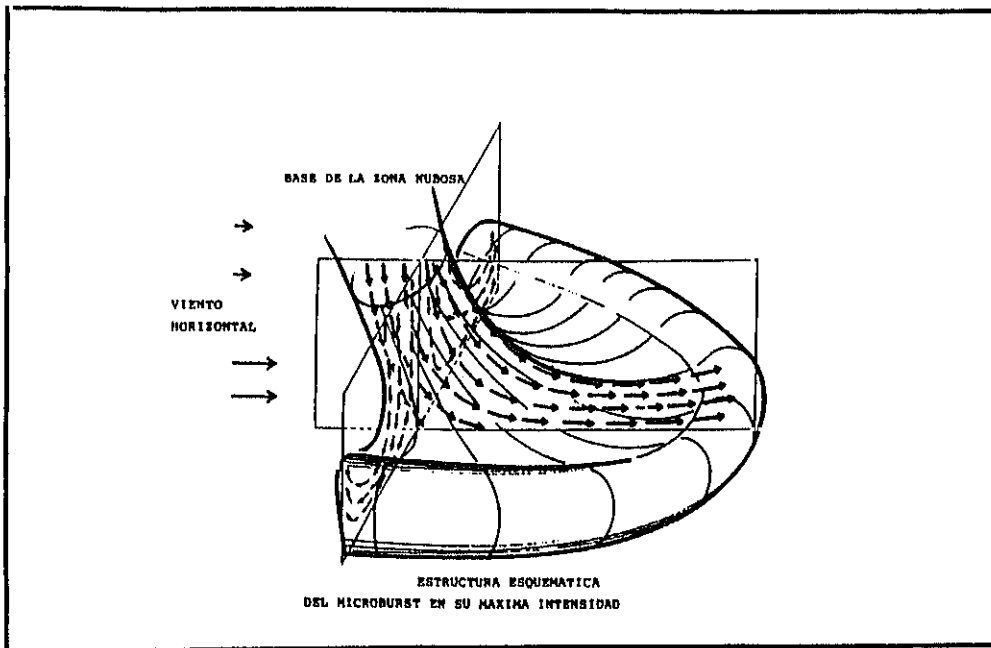


Fig. 2.5 : Representación tridimensional de un Microburst sometido a fuertes vientos de superficie, reflejándose el desarrollo del rotor horizontal en el borde del outflow.

fenómeno en su fase de máxima intensidad con los ejes y planos de simetría y el desarrollo del rotor horizontal en el borde del *outflow* que va alejándose del centro de la descendencia.

2.1.2.- LÍNEAS DE MICROBURST

En un mismo sistema meteorológico se pueden producir más de un Microburst de forma simultánea formando una línea, con lo que se origina una serie de torbellinos horizontales embebidos unos dentro de otros, observándose una serie de descendencias con sus correspondientes *outflow* (Kessinger et al., 1983). Las líneas de Microburst permanecen a menudo durante un largo período de tiempo, renovándose con nuevos Microburst que aparecen en ella. Se forman con la asociación de las descendencias y *outflows* de al menos dos Microburst, pero hay que tener en cuenta que las líneas de Microburst representan un nivel de organización en la producción de descendencias, superior al de los Microburst individuales. Realmente no es una simple asociación de Microburst próximos sino que es una organización lineal de producción de descendencias que puede persistir durante un período de tiempo considerable. La convergencia hacia la descendencia en su parte superior, sucede de manera continua a lo largo de toda la línea y no sólo en puntos aislados (Hjelmfelt y Roberts, 1985).

La línea de Microburst se puede considerar como una línea de descendencias con expansión en superficie y creación de *outflows* a ambos lados y en los extremos, aunque muy a menudo los Microburst que componen la línea sean claramente apreciables. En el caso que estos Microburst sean plenamente identificables forman lo que se denomina una línea discreta y si su identificación es difícil se designa como línea homogénea, aunque ciertamente se pueden dar todos los casos intermedios posibles.

En los casos reales examinados durante el proyecto JAWS y con bastante frecuencia, las líneas de Microburst tienen simultáneamente partes homogéneas y partes discretas y en muchos casos aparecen distintos grados de homogeneidad en diferentes etapas de su desarrollo. La cizalladura a través de la línea tiene intensidad semejante a la del Microburst individual, aunque la línea tenga mayor tamaño y duración de vida que éste.

Las líneas de Microburst se originan predominantemente como consecuencia de tormentas organizadas en líneas. Comienzan normalmente como un Microburst individual que se va uniendo a otros formándose así la línea. A veces se forman tras la aparición y posterior crecimiento de divergencia a lo largo de una línea, desarrollándose más tarde los Microburst. Durante la vida del Microburst suelen producirse nuevas intensificaciones es decir nuevos Microburst en diversos puntos de la línea.

La mayoría de los *outflow* de las líneas de Microburst tienen un lado perfectamente definido y otro peor definido donde la corriente se mezcla gradualmente con el viento del entorno. La escala de tiempos de la línea del Microburst es superior a la duración de los Microburst individuales antes de su disipación. Su finalización puede producirse de varias maneras ya que en algunos casos aparece un decaimiento general a lo largo de toda la línea, mientras que en otros casos la línea se descompone quedando un solo Microburst (Hjelmfelt, 1988).

En la *Figura 2.6* , se muestra esquemáticamente la estructura de una línea

de Microburst, con los valores promedios de la características más significativas. En la sección transversal perpendicular al eje de la línea de Microburst, la estructura es generalmente muy similar a la de un Microburst individual.

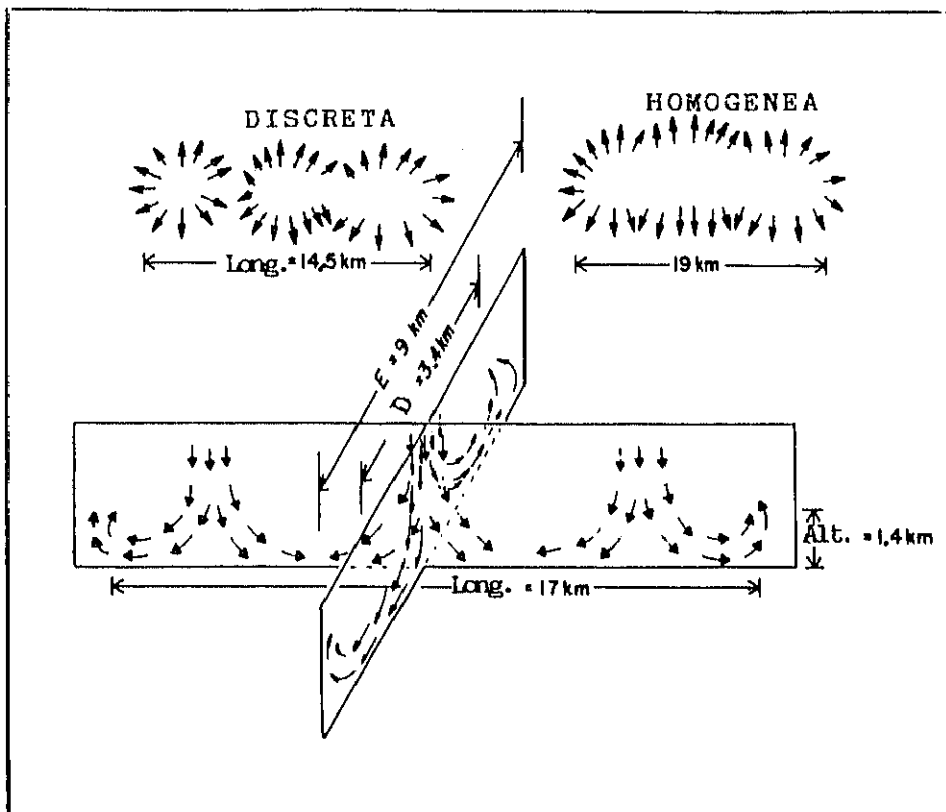


Fig. 2.6 : Representación esquemática de líneas de Microburst discretas y homogéneas. Se muestra una perspectiva de una sección transversal vertical con los valores medios observados.

La mayor parte de las líneas de Microburst se desplazan muy poco durante su existencia tendiendo a tener la misma orientación que los vientos al nivel de la base de las nubes. De los casos estudiados en los proyectos JAWS y CLAWS el valor promedio de la velocidad diferencial radial máxima $\Delta V_{m\acute{a}x}$ observada en

cualquier punto de la línea a lo largo de su desarrollo es de 26 m s^{-1} mientras que el promedio del valor medio en toda la línea en el momento de máxima velocidad radial es de 15 m s^{-1} . Las grandes líneas de Microburst tienden a tener valores medios de velocidad superiores a los de las líneas más cortas.

La longitud media de las líneas es del orden de los 17 km y la anchura D en el punto de velocidad diferencial radial máxima de 3,4 km siendo la distancia media E de borde a borde del *outflow* del orden de los 9 km. Normalmente las líneas de Microburst después de llegar al máximo de velocidad radial no muestran más expansión. La media en la altura del *outflow* está en 1,4 km, algo más alta que la de los Microburst individuales.

La reflectividad en el centro de la descendencia y en el instante de velocidad diferencial radial máxima oscila entre 20 y 65 dBz siendo el valor medio 49 dBz, en tanto que en el punto de máxima velocidad del *outflow* los valores de reflectividad son menores y similares al de los Microburst individuales.

Las líneas de Microburst tienen por lo regular entre dos y seis Microburst actuando simultáneamente en su interior con un promedio de duración de una hora, aunque el tiempo de vida medio de los Microburst que forman la línea es semejante a la de los Microburst individuales. Las líneas homogéneas tienen mayor longitud que las líneas discretas pero su duración y velocidad diferencial radial máxima son semejantes.

Los métodos de detección radárica del Microburst tienen que tener en

cuenta las particularidades de las líneas de Microburst. Un radar que apuntara a la línea desde un punto situado en la prolongación imaginaria de la línea, detectaría claramente la divergencia, identificando fácilmente el Microburst, pero detectaría muy poca cizalladura radial, y no podría determinarse si es una línea de Microburst o un Microburst individual. Cualquier método radárico de detección de Microburst debe tener esto muy en cuenta, ya que las líneas de Microburst deben ser identificadas para poder prever la influencia de su forma y duración.

2.1.3.- ANÁLISIS DE LA SIMETRÍA DEL MICROBURST

Wilson et al. (1984) examinaron la simetría del *outflow* del Microburst mediante observaciones con radar Doppler múltiple en varias experiencias. De su análisis se desprende que en promedio la velocidad diferencial radial máxima $\Delta V_{m\acute{a}x}$ alcanza un valor doble en el diámetro donde se presenta el máximo absoluto de cizalladura del Microburst, que en el diámetro donde aparece el mínimo. Asimismo la distancia entre los puntos de máxima cizalladura, varía según el diámetro que se tome, con lo que puede suponerse que la forma de la zona de precipitación está relacionada con la simetría del fenómeno.

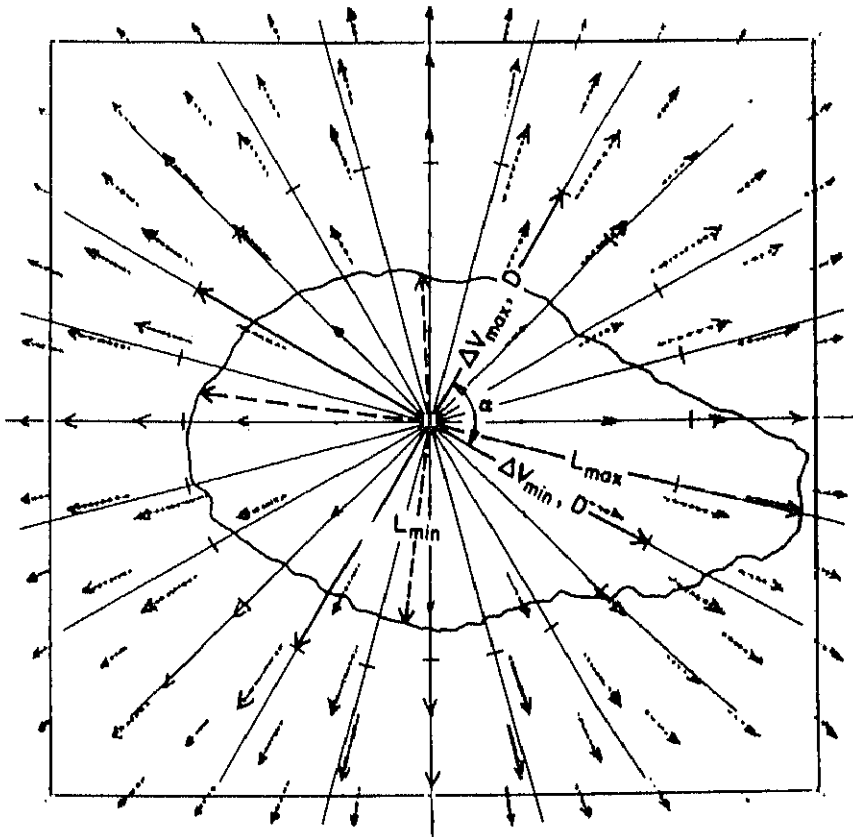


Fig. 2.7 : Diagrama esquemático de los parámetros de simetría del Microburst.

La orientación del diámetro de $\Delta V_{m\acute{a}x}$ no muestra aparentemente ninguna relación con los vientos en la base de la nube o a nivel del suelo, siendo el ángulo promedio α entre los diámetros de $\Delta V_{m\acute{a}x}$ y $\Delta V_{m\acute{i}n}$ del orden de 75° que, teniendo en cuenta el método de ensayo se aproxima bastante a la perpendicularidad. La relación media entre los valores de los ejes mayor $L_{m\acute{a}x}$ y menor $L_{m\acute{i}n}$ del perfil de divergencia es similar al valor medio de la relación entre $\Delta V_{m\acute{a}x}$ y $\Delta V_{m\acute{i}n}$ de los Microburst estudiados. En la *Figura 2.7* se muestra un esquema de los parámetros de simetría medidos que se observaron durante los experimentos realizados.

2.2.- ESTUDIO DINÁMICO DEL MICROBURST

La amenaza contrastada que para la seguridad del transporte aéreo representan los fenómenos de descendencias que hemos denominado *Microburst*, ha motivado que a partir de los últimos años de la década de los ochenta y hasta la actualidad los meteorólogos se hayan interesado en conocer los procesos físicos que conducen al desencadenamiento y mantenimiento del *Microburst*. Como ya se ha indicado anteriormente, a partir de las experiencias realizadas en el proyecto *Thunderstorm* se identificaron las descendencias como aspectos particulares e importantes dentro de los fenómenos tormentosos. Inicialmente se supuso que la razón del desarrollo de las descendencias en una tormenta se debía al arrastre hacia abajo que creaba la propia tormenta unido al efecto de la precipitación. También se consideró como posible causa del inicio de la descendencia la inercia que hace que la corriente ascendente supere por su velocidad la altura a la que alcanzaría el equilibrio. Se constató que las descendencias alcanzaban su máxima intensidad en los niveles medios de la nube, con una anchura media de 1,2 km y que al llegar a la superficie del terreno se expandían en forma de capas frías, observándose que la intensidad de la descendencia no varía con la altura, excepto claro está, en las proximidades del suelo (Byer y Braham, 1949).

El *downburst* por tanto, no puede ser una descendencia de ese mismo tipo ya que se distingue por la continua intensificación en su descenso, alcanzando las velocidades verticales máximas cerca del suelo, lo que origina la explosión de ráfagas superficiales.

Condiciones atmosféricas

En relación con las condiciones atmosféricas que favorecen y fomentan los flujos descendentes, se ha determinado que el Microburst sucede siempre en zonas atmosféricas con fuerte actividad convectiva, normalmente asociadas al desarrollo de tormentas, aunque se tienen datos de Microburst ocurridos en lugares donde no se había identificado ninguna tormenta, particularmente en climas muy secos en los que pueden producirse fuertes Microburst antes de que la actividad convectiva haya formado la tormenta propiamente dicha (Srivastava, 1987). En general el Microburst se produce por debajo de nubes del tipo cumulonimbo, es decir, nubes de desarrollo vertical de masa muy grande que son particularmente tormentosas y que frecuentemente presentan actividad eléctrica. Para que se forme una nube convectiva del tipo cumulonimbo el aire ha de tener un alto grado de humedad relativa y temperatura moderadamente alta, además la convección puede producir fuertes vientos de superficie hasta aproximadamente 60 metros de altitud. La mayoría de los Microburst tienen, como punto en común, su origen en una descendencia que aparece en una zona donde se está produciendo precipitación, así como una capa de aire de gran espesor en donde la variación de temperatura con la altura se aproxima a la de la adiabática seca que es aproximadamente de 10 K km^{-1} . En estas condiciones, las descendencias pueden alcanzar velocidades de 10 a 20 m s^{-1} sin necesitar mucha precipitación. Esto permite explicar el fenómeno de los Microburst secos en tormentas en las que la base de las nubes está alta. La presencia

de precipitación en forma de virga es siempre un indicador muy ilustrativo de estos fenómenos.

Si la estratificación térmica se hace más estable se necesita mayor cantidad de precipitación, con lo que el Microburst puede llegar a ser de tipo húmedo si la precipitación no llega a evaporarse totalmente antes de llegar al suelo. También se ha referenciado que algunos Microburst húmedos pueden suceder con gradientes verticales de temperatura de 6 K km^{-1} que corresponden a atmósferas bastante estables (Srivastava, 1985).

Mezcla de agua y hielo

En el proceso de evaporación de la lluvia puede producirse además el fenómeno de rotura de las gotas de agua, que se origina sobre todo con fuerte precipitación, provocando una evaporación más intensa del agua. Estos efectos combinados son justificativos de la existencia de Microburst con variación de temperatura cercana a la adiabática húmeda (pseudoadiabática). Si se supone que el tamaño inicial de las gotas de lluvia se ajusta a una distribución exponencial y que la masa de las gotas de lluvia varía prácticamente de forma lineal con la altura, el calor de vaporización extraído de capas de tamaño semejantes es el mismo (Matsuo y Sasyo, 1981). Sin embargo el comportamiento de la masa de las partículas de hielo es diferente. Inicialmente el calor decrece linealmente con el tiempo, pero al acercarse a la fusión total, el proceso

se acelera por lo que la mayor parte del calor se extrae de una capa estrecha cerca del punto de fusión total. Posteriormente la partícula inicia su evaporación. Una partícula de hielo puede fundirse en un recorrido mucho menor que el que necesita una gota de lluvia para su evaporación completa y cuando, como muchas veces ocurre, el agua no tiene recorrido para evaporarse totalmente ambos procesos producen cantidades semejantes de calor para masas iguales, pese a que el calor latente de vaporización del agua es unas 7,5 veces mayor que el calor latente de fusión del hielo.

La rotación que se observa en la mayoría de los flujos descendentes que se convierten en Microburst puede deberse a factores dinámicos o a la conservación del momento angular y a la aceleración de la corriente en su descenso. Fujita y Wakimoto (1983) establecen la hipótesis, de que la rotación disminuye el diámetro del flujo descendente pero aumenta su intensidad al concentrar la precipitación en el centro del flujo, en tanto que otros investigadores como Klemp y Rotunno (1983), afirman que los gradientes verticales de presión creados dinámicamente por flujos turbulentos pueden producir fuertes flujos descendentes.

Para comprobar si los procesos anteriormente descritos pueden generar el *Downburst*, Srivastava (1987) utilizó un modelo unidimensional para estudiar el comportamiento de una columna de descendencia introducida en un entorno de condiciones predeterminadas, en el que ambos, descendencia y entorno eran horizontalmente homogéneas. El entorno y la columna de descendencia en su

extremo superior tenían condiciones estacionarias, suponiendo una determinada distribución de partículas que podían estar formadas por granizo sólido o granizo blando compuesto por nieve y lluvia, pero nunca una mezcla de varios tipos. Los cambios en el tamaño de las partículas y su concentración, la temperatura, velocidad vertical y otras propiedades termodinámicas se calculan en función del tiempo, a medida que descienden las partículas por la columna cuyo extremo inferior se considera abierto.

Los resultados permitieron determinar que las precipitaciones con mezcla de partículas en forma de hielo, incrementan la intensidad de la descendencia comparativamente con el caso de que las precipitaciones sean en forma de lluvia. Estos efectos aumentan con el contenido de la precipitación y la estabilidad atmosférica.

2.2.1.- ESTUDIO DEL CAMPO DE VELOCIDADES EN EL MICROBURST DESARROLLADO

Los flujos descendentes que inician el fenómeno del Microburst estudiados en JAWS tienen un diámetro aproximado en valor medio de 1.3 km y esta anchura aumenta en las zonas bajas donde se acusa la influencia del suelo. El flujo se acelera en su descenso, alcanzando las velocidades máximas de descenso en alturas de unos pocos centenares de metros sobre el terreno. En la zona alta del flujo se produce convergencia horizontal, y en la parte más baja divergencia. La mayor parte de los flujos descendentes analizados mostraban rotación, que puede ser debida a la conservación del momento angular y a la aceleración de la corriente en su descenso, si bien es cierto que esta rotación es muy pequeña y solo está bien desarrollada durante cortos períodos de tiempo. Hjelmfelt (1988) analizó la distribución o campo de velocidades en la zona de expansión respecto a la altura y al tiempo, comprobando que el *outflow* del Microburst alcanza muy pronto su altura total, mantiene esa altura casi constante y luego la pierde cuando el Microburst decae. La velocidad crece y decrece simultáneamente a todos los niveles dentro del *outflow*. Los perfiles de velocidad indican que la velocidad diferencial radial máxima $\Delta V_{máxima}$ en cada instante a lo largo de la vertical del *outflow* se suele dar a baja altura, decayendo la velocidad lentamente por encima de dicho punto y rápidamente por debajo del mismo debido al efecto del suelo. El valor máximo de ΔV en un instante cualquiera de la vida del Microburst se sitúa casi exactamente en el punto medio de la distancia radial al borde. El reforzamiento del Microburst crece linealmente con el tiempo desde la primera observación hasta el instante de máxima intensidad. Después de iniciarse el decaimiento pueden ocurrir reintensificaciones

que hacen que el tamaño del Microburst se mantenga casi constante durante algunos minutos. Si no aparecen reintensificaciones la velocidad radial decae rápidamente. Se ha observado que algunos Microburst muestran un segundo máximo de velocidad radial varios minutos después del primero, lo que sugiere que se producen variaciones cíclicas de intensidad durante la vida del Microburst, con lo que se explicaría la aparición de más de un rotor en alguno de estos fenómenos (Hjelmfelt, 1987). La distancia D entre los puntos de mayor diferencia de velocidades a una determinada altura, (ver *Figura 2.2*), crece casi linealmente al principio mientras el Microburst se acerca a su máxima intensidad, después de este crecimiento muchos Microburst muestran tamaño constante hasta la disipación, y otros siguen expandiéndose superando el tamaño tipo de un microburst y convirtiéndose en *outflow* más grandes pero menos intensos. Los puntos donde se produce la máxima diferencia de velocidad están muy cerca del suelo entre los 50 y 100 metros como valor promedio, por encima de esa altura la velocidad crece muy lentamente, en tanto que por debajo y en los puntos cercanos al suelo los valores de velocidad radial son menores debido fundamentalmente al efecto de la fricción (Wilson et al. 1984). Dentro del *outflow*, la distancia entre los puntos de máxima diferencia de velocidades es aproximadamente constante con la altura mientras que existe gran variabilidad por encima del *outflow*.

El estudio de la variación de la velocidad medida en cada punto del *outflow* en función de la distancia radial R desde el centro del Microburst y para distintos instantes de tiempo indica que cerca del instante de máxima velocidad radial los perfiles de velocidad son relativamente suaves, haciéndose más

complicada dicha estructura cuando la velocidad decae. Dentro de la región de impacto y debajo de la descendencia, el incremento de velocidad que se deduce de la teoría del *wall jet*, (Bradshaw y Love, 1959) es proporcional a $R/R_{v\text{ máx}}$ de forma análoga a lo que ocurriría con un movimiento potencial simple, en donde $R_{v\text{ máx}}$ es la distancia del punto de máxima velocidad radial al centro del Microburst. La velocidad máxima se produce algo más alejada de la zona de impacto, mientras el *wall jet* se está constituyendo. Una vez superado el valor máximo, la caída de velocidad del *wall-jet* es inversamente proporcional a $R/R_{v\text{ máx}}$. Sin embargo, el Microburst se comporta de forma semejante al *wall-jet* hasta llegar al máximo de velocidad, pero a continuación las velocidades decaen mucho más deprisa con una relación inversamente proporcional a $(R/R_{v\text{ máx}})^2$. La justificación de esta discrepancia podría estar en que el modelo del *wall-jet* considera situación de estancamiento en las proximidades del fenómeno, y por tanto la pérdida de velocidad se debe en su mayor parte a simple expansión, además de que los rotores horizontales transforman mucha velocidad horizontal en vertical (Sadeh y Mukherji, 1974). Por contra las condiciones del entorno perturban el perfil de velocidades del Microburst real y los efectos de los obstáculos físicos, vientos contrarios, etc, se hacen más perceptibles cuanto más nos alejamos del punto de máxima velocidad.

2.2.2.- TRANSPORTE DE ENERGÍA CINÉTICA EN EL MICROBURST

El estudio de la ecuación de la energía cinética de una tormenta puede revelar importantes procesos físicos que influyen en el desarrollo del Microburst, así como también indica dónde y por qué se producen las mayores velocidades en un proceso convectivo. Hasta los últimos años apenas se habían realizado estudios acerca del efecto de las áreas de fuerte convección sobre su entorno, debido a la dificultad de obtener datos relativos a medidas simultáneas del viento en puntos de distintas coordenadas horizontales y a todas las alturas. Ensayos realizados por el NSSL (1977) con lanzamiento de globos sonda, permitieron estudiar las tormentas a escala meso-beta, deduciendo que las zonas con fuerte convección se caracterizan por una gran generación y disipación de energía cinética. Posteriormente se analizó el transporte de energía cinética a escala meso-alfa y meso-beta, (Fuelberg y Jedlovec, 1982) comprobando que la transformación de energía en un entorno convectivo es mayor y sus efectos más apreciables que en fenómenos a escala sinóptica. Actualmente la utilización del radar Doppler dual y el múltiple permiten medir el campo de velocidades en toda la tormenta para posteriormente deducir los campos de presiones y el empuje por flotación. Con las informaciones obtenidas en el proyecto JAWS (1982) se pudieron estudiar las propiedades cinemáticas, dinámicas y termodinámicas de tormentas que provocaron Microburst, lo que permitió comprender mejor la estructura del Microburst y los procesos físicos que conducen a su desarrollo.

A partir de las ecuaciones de cantidad de movimiento en un sistema de coordenadas cartesiano, Lin y Coover (1989) evaluaron la energía cinética en un

sistema no hidrostático como suma de las contribuciones debidas a la divergencia horizontal del flujo (DHF), la divergencia vertical del flujo (DVF), la generación horizontal de energía cinética (GHE), la generación vertical de energía cinética (GVE), la producción total de flotabilidad por empuje (PFE) y la disipación de energía cinética (DEC). Estos autores estudiaron un caso real de descendencia con un volumen de base cuadrada de 10x10 Km centrado en una tormenta en la que se desarrolló un Microburst. Se midió la componente vertical del viento w a todos los niveles de altura comprobándose que aparecían valores ligeramente negativos del orden de $-0.2, -0.3 \text{ m s}^{-1}$ por debajo de los 3 km de altura y valores positivos por encima de los 3 km en los que se llegaba hasta 1.2 m s^{-1} . Este aspecto se justifica por el hecho del predominio del Microburst en la capa más cercana al suelo y por contra el predominio de las ascenciones en las capas a media y gran altura. Se considera positiva la contribución de generación horizontal de energía cinética cuando el viento sopla de zonas de alta presión a zonas de menor presión, teniendo en cuenta que el Microburst tiene un fuerte gradiente de presión horizontal a baja altura, que crea una corriente divergente de vientos junto a la superficie del terreno desde su centro hacia afuera, que es lo que se ha denominado *outflow*. En las capas medias el valor positivo se debe a la combinación de alta presión en la zona superior de las ascenciones y de baja presión en su zona inferior.

Las conclusiones cualitativas que se obtuvieron de este estudio son:

- La energía cinética se transporta hacia abajo en las capas inferiores debido a la acción del Microburst, mientras que por encima de él se

transporta hacia arriba debido a las ascensiones de la tormenta.

- Los términos debidos a la divergencia horizontal del flujo y a la generación horizontal actúan como una fuente de energía cinética y la disipación como un sumidero.

- La divergencia horizontal del flujo de energía cinética predomina en la capa superior y la convergencia predomina en las capas inferiores. Los términos de la divergencia horizontal y vertical del flujo se equilibran entre sí.

- Los términos debidos a la producción de energía cinética provocada por el empuje y por la generación vertical están equilibrados.

2.2.3.- INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA EN EL MICROBURST

La temperatura no es un indicador fiable del fenómeno del Microburst ya que de las experiencias realizadas se han obtenido valores tanto más altos como más bajos que la temperatura ambiente (Lin et al., 1987). En un Microburst húmedo con una fuerte descendencia, la temperatura del aire del Microburst frecuentemente es más fría ya que la corriente descendente puede calentarse según la adiabática seca hasta el suelo, a menos que las gotas de lluvia puedan evaporarse con la suficiente rapidez como para mantener un descenso según una adiabática húmeda (pseudoadiabática). Sin embargo, en la región de la descendencia de gran humedad relativa y fuerte movimiento descendente, predomina el calentamiento debido a la compresión provocado por el descenso, con lo que la temperatura se hace superior a la del entorno. Por el contrario en las zonas de baja humedad relativa y descenso lento se provoca un déficit en la temperatura. El máximo enfriamiento se produce en la altura donde la velocidad vertical se reduce a cero (Srivastava, 1987).

Debido a estas condiciones la temperatura del aire del Microburst depende de cuál de estos factores sea predominante, y puesto que todos ellos tienen muy difícil cuantificación hay que concluir que la temperatura no es un parámetro que pueda utilizarse por sí solo para detectar o predecir la presencia del Microburst.

2.2.4.- DETECCIÓN DEL MICROBURST

Debido a que el fenómeno meteorológico del Microburst no da información visual de su desarrollo, su detección era particularmente difícil hasta relativamente hace poco tiempo. Existen algunos indicadores, que por estar asociados en numerosas ocasiones a este fenómeno, pueden alertar sobre su presencia. Entre ellos se cuentan: tormentas a gran altura, precipitaciones que se disipan antes de llegar al suelo, cambios rápidos en la dirección e intensidad del viento, polvareda, etc,... El indicador visual de la aparición de polvareda es muy definitorio para la detección del fenómeno Microburst si lo que se aprecia es un anillo turbulento que se está expandiendo y se observan los bordes de la zona de expansión superficial, aunque ciertamente estas características no siempre pueden observarse y no se puede depender de ellas para la detección del fenómeno. Dado que, como ya se ha indicado anteriormente, y se deduce de las estadísticas de incidentes y accidentes aéreos, la cizalladura es tanto más peligrosa cuando la aeronave se encuentra cerca del suelo, muchos de los trabajos de investigación sobre la detección del fenómeno Microburst tienen el objetivo de dotar a los aeropuertos de sistemas fijos de detección.

Tradicionalmente los métodos disponibles se basaban en la utilización de anemómetros para la detección de cizalladura. Un perfeccionamiento de este método conocido como LLWAS (Low Level Windshear Alert System), patrocinado por FAA (1989) consiste en instalar una serie de anemómetros formando una figura regular y cuyas lecturas se comparan con el viento en el campo central donde se realizan las operaciones. Cuando existen diferencias importantes entre las velocidades del viento que marcan esos anemómetros esta

información puede ser un indicativo de la aparición del fenómeno de las turbulencias descendentes. No obstante, como con este método se mide el gradiente de la velocidad del viento en el plano horizontal a nivel del suelo y no a lo largo de las trayectorias de aproximación y descenso, su efectividad aún siendo importante, tiene muchas limitaciones. Para minimizar en lo posible el problema de las limitaciones por falsas alarmas, se ha perfeccionado el método determinando la velocidad media del aire en el dominio sometido a estudio y descomponiendo la velocidad del aire en la componente debida al valor medio y en la componente turbulenta, utilizando el método de los triángulos para calcular el flujo total a través de una superficie triangular, y el método de las líneas para detectar la divergencia a lo largo de la línea que une dos puntos de medida (Zorpette, 1986). Para ello, los sensores se colocan en los vértices de los triángulos y en los extremos de las líneas.

Sin embargo este sistema no es capaz de detectar Microburst que aún no han llegado al suelo o que son muy asimétricos, y además la zona de estancamiento que se produce justo en el centro del Microburst puede producir señales que dan información errónea al sistema.

Actualmente se está en la fase de investigación sobre los sistemas que instalados en tierra, pretenden captar la presencia de gradiente del viento a lo largo de las trayectorias reales de aproximación y despegue. Estos sistemas son el radar conveccional, el radar Doppler y el Sodar.

El radar meteorológico convencional se utiliza tradicionalmente para detectar zonas de atmósfera turbulenta a gran distancia, detectando además la

cantidad de precipitación que es un indicativo de la turbulencia debido a la relación existente entre ambas. Pero este no es un método adecuado para la detección del Microburst, ya que según las observaciones realizadas no se ha podido encontrar una relación determinada entre la cantidad de precipitación y la intensidad del Microburst. Además este tipo de radar es poco efectivo a baja altura debido a las perturbaciones producidas por el terreno. No obstante la información que proporciona puede ser útil, aunque por sí solo no sirva para crear un sistema de detección fiable del fenómeno Microburst.

El radar Doppler, que tiene la gran ventaja de poder medir la componente radial del viento, se utiliza fundamentalmente en el estudio de la dinámica de las tormentas en alturas superiores a las que interesan para este estudio que corresponderían a baja cota. Además está en discusión su utilidad para lugares en donde la cizalladura siempre viene acompañada de precipitación. Por tanto el radar Doppler podría ser adecuado para la instalación en zonas en las que hay constancia de que frecuentemente aparece cizalladura no asociada a precipitaciones (Kessler, 1990).

Un sistema telemétrico de detección por sonido denominado SODAR, de características similares al radar pero a base de ondas sonoras y técnicas Doppler, para observar las capas de gradiente del viento y las inversiones de temperatura en los estratos inferiores de la atmósfera tiene el inconveniente de no dar información adecuada en zonas con precipitación lluviosa de gran intensidad o ambientes ruidosos.

A alta cota los sistemas de detección desarrollados utilizan el efecto

Doppler además de los radares meteorológicos convencionales que permiten aportar suficiente información para deducir a distancia la presencia de un régimen turbulento.

En un principio los radares meteorológicos solo detectaban la cantidad de precipitación, pero como ésta viene ligada con el grado de turbulencia, se tenía un indicativo de la misma cuando se media dicha cantidad de precipitación. La incorporación a los radares de los sistemas de detección por técnicas Doppler permiten detectar cambios de velocidad del viento por debajo de valores de 6 m s^{-1} , considerados como turbulencias severas por el NSSL (National Severe Storms Laboratory), e indican la distancia a la que está la señal de régimen turbulento así como el gradiente de la velocidad del viento.

2.3.- INDICADORES OBTENIDOS

De las informaciones disponibles a lo largo de las experiencias realizadas se puede asegurar que todas las tormentas producen descendencias. Ahora bien, que estos flujos descendentes alcancen o no la intensidad de Microburst depende de la situación particular de la tormenta cuando se inicie la descendencia. Dada la naturaleza caótica de los fenómenos turbulentos, la predicción del Microburst sólo puede hacerse en términos probabilísticos. Las observaciones y estudios realizados indican cuáles son las circunstancias que favorecen el desarrollo del Microburst y van a analizarse agrupadas en tres conjuntos, atendiendo primero a los períodos del año que son más favorables para el desarrollo del Microburst, en segundo lugar para predecir si una tormenta tiene una alta probabilidad de formación de Microburst antes de que se desarrolle, y en tercer lugar para predecir el Microburst justo antes de su inicio

a) Épocas del año favorables al desarrollo del Microburst.

En relación con este aspecto, los períodos de primavera y otoño por ser las estaciones del año con mayor actividad convectiva, son las más favorables a la generación de Microburst. En la Península Ibérica son especialmente importantes los períodos de final de primavera y comienzo del otoño, ya que se corresponden con situaciones de alta humedad e inestabilidad por calentamiento (Font, 1983).

b) Predicción previa a la tormenta.

El estado de la atmósfera previo a la tormenta es determinante para el desarrollo del Microburst. Entre los indicadores que informan de la probabilidad de un suceso de Microburst durante un fenómeno tormentoso se tienen:

i) El gradiente vertical de temperatura.

Si los sondeos realizados indican un gradiente de temperatura mayor que el correspondiente a una atmósfera estable pudiera dar lugar a que un flujo descendente alcance la intensidad de Microburst. La probabilidad que suceda este fenómeno en una tormenta aumenta según lo haga el gradiente vertical de temperatura. Experimentalmente se ha observado que la mayoría de los Microburst se producen con gradientes verticales de temperatura mayores de 8 K km^{-1} , es decir, con atmósferas inestables.

ii) La hora del día.

Se ha determinado que los Microburst tienden a producirse una vez pasado el mediodía. La explicación es que a esas horas es cuando más fácilmente se producen los fenómenos convectivos, ya que el sol ha tenido tiempo de calentar el aire que está en contacto con el terreno, creando una capa bastante inestable a nivel del suelo.

iii) Existencia o ausencia de una capa de pequeña humedad relativa a

baja altura.

El Microburst suele desarrollarse cuando la diferencia entre la temperatura ambiente y el punto de rocío es mayor de 20 K .

Se hace evidente que un sistema efectivo de predicción del Microburst debería ser capaz de estimar el gradiente vertical de temperaturas de forma continua a lo largo de las horas de mayor probabilidad de ocurrencia del Microburst. Es muy importante poder determinar el gradiente de temperaturas entre los niveles atmosféricos correspondientes a 700 y 500 milibares, ya que se ha comprobado que habitualmente esos niveles son las fronteras de la capa de mezcla (Caplan et al., 1990). Esto es posible conseguirlo mediante el método RASS (Radio Acoustic Sounding System) que utilizando información procedente de un radar, obtiene la temperatura en función de la altura de una manera continua sobre la vertical del radar, pudiendo efectuarse un sondeo de todas las alturas en que interese tener la información cada pequeños intervalos de tiempo.

c) Predicción inmediata.

Se entiende por predicción inmediata la anticipación del fenómeno cuando faltan pocos instantes para que se produzca. Existen varios indicadores que pueden informar de la probabilidad de que un Microburst se inicie en un plazo próximo de 5 a 10 minutos y entre ellos se cuentan los siguientes:

- Descenso de un núcleo de reflectividad. Cuanto mayor es la reflectividad más intensa es la precipitación en ese punto.

Habitualmente un Microburst intenso se produce a partir de una precipitación cuya reflectividad es mayor de 50 dBz.

- Convergencia sobre la base de las nubes.
- Convergencia bajo la base de las nubes.
- Fuertes gradientes de reflectividad en la zona.
- Rotación.
- Presencia de precipitación que se evapora antes de llegar a la superficie.

La aparición repentina de varias de estas características indica que se está iniciando con mucha probabilidad un Microburst. Ciertamente depende de la claridad con que estos factores se presenten para tener mayor o menor certeza en la probable aparición del Microburst.

Por ello el proceso recomendable para la predicción inmediata debe constar de dos fases:

- Primera fase: estimar si desciende un núcleo de reflectividad, lo cual indica el inicio de un flujo descendente.
- Segunda fase: si se ha determinado que efectivamente se está iniciando un flujo descendente, sopesar los otros indicadores para predecir la intensidad de los vientos que se produzcan.

Por otro lado, el gradiente de reflectividad y la rotación son los factores menos significativos. Tiene más importancia que se produzca convergencia tanto sobre como por debajo de la base de las nubes. Si no hay convergencia la intensidad de la descendencia será pequeña. La presencia de precipitación antes

mencionada, indica que están sucediendo procesos evaporativos que pueden acelerar la descendencia.

CAPÍTULO 3

MODELIZACIÓN DEL FENÓMENO MICROPURST

SÍMBOLOS EMPLEADOS

| | |
|-----------|--|
| C_p | calor específico a presión constante |
| C_v | calor específico a volumen constante |
| e | energía interna específica |
| F | fuerza |
| g | aceleración inducida por el campo giratorio terrestre |
| K | coeficiente de conductividad térmica del aire |
| n | coeficiente de las transformaciones politrópicas |
| p | presión |
| \dot{Q} | cantidad de calor |
| q | flujo de calor por unidad de área |
| R | constante característica del aire |
| T | temperatura |
| t | tiempo |
| u | componente de la velocidad en la dirección del eje OX |
| \hat{u} | energía interna molecular específica |
| V | velocidad |
| v | componente de la velocidad en la dirección del eje OY |
| V | volumen |
| \dot{W} | trabajo |
| w | componente de la velocidad en la dirección del eje OZ |
| x | componente del vector de posición en la dirección del eje OX |
| y | componente del vector de posición en la dirección del eje OY |

| | |
|-------------|--|
| z | componente del vector de posición en la dirección del eje OZ |
| μ | coeficiente de viscosidad del aire |
| γ | relación de calores específicos |
| ρ | densidad |
| τ_{ij} | tensor de esfuerzos viscosos |
| ∇ | operador gradiente |

El carácter vectorial de una magnitud se indica en **negrita**.

Todas las unidades usadas en este trabajo vienen dadas en el Sistema Internacional.

3.- MODELIZACIÓN DEL FENÓMENO MICROBURST

3.1.- INTRODUCCIÓN. MODELO CONCEPTUAL

El vertiginoso desarrollo de la informática en los últimos años ha permitido que la simulación numérica sea un campo de la ciencia en plena expansión. En la actualidad es una poderosa herramienta para realizar muchos estudios científicos que requieren una experimentación muy costosa o que son imposibles de realizar en la realidad de forma controlada para su análisis. La clave está en el aumento de la velocidad de cálculo, de la capacidad de almacenamiento de datos y de la programación estructurada en lenguajes de alto nivel.

En muchas ramas de las ciencias se han logrado grandes avances debido al recurso comentado anteriormente, pero entre las más beneficiadas pueden contarse sin duda la Mecánica de Fluidos y la Meteorología. Dada la importancia económica que la predicción del tiempo tiene para la sociedad, se han invertido en los últimos años gran cantidad de fondos públicos, en programas internacionales para el desarrollo de procesos de predicción del comportamiento de la atmósfera a escala sinóptica que fueran fiables. Hoy en día se utilizan programas de predicción numérica del tiempo a corto y medio plazo.

Desafortunadamente, y pese al gran perfeccionamiento de dichos programas, no sería posible aplicarlos fácilmente a la simulación y predicción del desarrollo del Microburst, ya que generalmente esos programas están particularizados a la solución de problemas muy concretos que no encajan con las peculiaridades de este fenómeno, ya que simplifican los procesos reales

ando de tener en cuenta los aspectos que no influyen en el fenómeno que
aren simular o predecir. Así por ejemplo, los programas utilizados para la
dicción del tiempo, fundamentalmente reproducen los movimientos de la
ósfera a escala sinóptica. Pero el fenómeno del Microburst es tan complejo
para describirlo con exactitud, no se puede apenas, hacer simplificaciones
proceso real. Se precisarían modelos que tuvieran en cuenta la aplicación de
cuaciones de la mecánica de fluidos, en su forma más general, a un sistema
dos componentes, aire y agua. Además se debería tener en cuenta que el
a puede estar en distintos estados de agregación y formas (vapor, lluvia,
ve, granizo, distintos tipos de cristales de hielo, ...) simultáneamente en la
ma zona, continuamente transformandose e interrelacionandose entre sí. Por
o habría que incluir las ecuaciones que gobiernan estos procesos microfísicos
se producen entre las diversas formas en que puede presentarse la
ipitación. Asimismo también se debería tener en cuenta la influencia del
eno.

Por todo lo anteriormente expuesto, hasta la fecha se han publicado muy
os estudios que traten específicamente sobre el tema de la simulación
érica del Microburst y los existentes analizan aspectos parciales del
fenómeno.

Aprovechando la simetría axial del Microburst, se fue trabajando a lo largo
os años con modelos para poder examinar la expansión superficial. El modelo
Teske y Lewellen (1977) simula la expansión superficial pero sin tener en
nta la precipitación. Consideraba el aire como el único componente y
delizaba el fenómeno proporcionando al aire unas condiciones iniciales de

velocidad vertical y temperatura en la frontera superior del dominio.

Srivastava (1985) realizó estudios para un flujo descendente unidimensional con un modelo microfísico. Consideraba únicamente la lluvia como posible precipitación. Sin concluir que aquello fuera un Microburst, demostró que una precipitación puede dar lugar a un flujo descendente, y que éste aumenta su intensidad según lo hacen factores tales como:

- variación de la temperatura con la altura,
- aumento de la concentración de la precipitación,
- aumento de la humedad relativa del ambiente, y,
- definición de la frontera entre el Microburst y el ambiente.

Comprobó que en el interior del Microburst la humedad relativa estaba siempre muy por debajo del punto de saturación, ya que el enfriamiento debido a la evaporación de la precipitación, tiene menos importancia que el calentamiento que se produce en el aire al comprimirse cuando desciende. El modelo propuesto por Srivastava al ser unidimensional no permitía predecir la forma o intensidad de la zona de expansión superficial del flujo descendente o *outflow*. Hjelmfelt (1987) en un modelo bidimensional concluyó que el aumento de densidad del aire debido a la evaporación del granizo es de magnitud semejante al aumento de densidad debido a la evaporación de la lluvia.

Krueger y Wakimoto (1984) tienen en cuenta la precipitación pero no consideran los efectos de fricción con el terreno. Asimismo Chuang et al. (1984) y Proctor (1985) también realizaron estudios dentro de la misma línea de

desarrollo. Posteriormente, Proctor (1988) desarrolló un método más completo, usando la versión axisimétrica del TASS (Terminal Area Simulation System), dentro de un programa de desarrollo conjunto entre la FAA (Federal Aviation Administration) y la NASA (National Aeronautic and Space Administration), y cuyo objetivo era la obtención de datos técnicos referidos al fenómeno del Microburst que pudieran ser utilizados en su detección, para poder evitarlo, o en casos lÍmites, sobrevivir a un encuentro real con el Microburst. Los datos obtenidos se utilizan hoy en día en simuladores de vuelo para el conocimiento del fenómeno, e indican las acciones que deben realizarse para soslayar los problemas que pueden producirse.

3.2.- MODELO FÍSICO

3.2.1.- OBJETIVOS DE LA SIMULACION NUMERICA

A la vista del estudio teórico del Microburst desarrollado en la primera parte y teniendo en cuenta la complejidad de los fenómenos físicos que interaccionan en la evolución del fenómeno, se van a desarrollar los siguientes aspectos:

- Reproducir el flujo descendente provocado por el enfriamiento de una zona de la atmósfera, realizando distintos estudios en los que se analiza la influencia de la intensidad del enfriamiento y las condiciones iniciales de la atmósfera.
- Conocimiento del campo de velocidades del *outflow* de un Microburst en el momento que se presenta la máxima divergencia en la velocidad del aire (*).

Los resultados obtenidos, asimilables a los que se pudieran haber

(*) Este campo de velocidades se utilizará posteriormente en una segunda simulación, en la que se estudiará cómo se ve perturbada la trayectoria de aterrizaje o despegue de una aeronave por la influencia del Microburst. A través de este estudio se indicarán las acciones que deben realizarse sobre el control de la aeronave a fin de minimizar los riesgos de accidente.

producido en la realidad, son de gran utilidad ya que pueden utilizarse para:

- Predecir el fenómeno, al establecer para qué condiciones iniciales de humedad, gradientes de presión y temperatura etc, puede desarrollarse el Microburst.

- Indicar métodos que pueden utilizarse para la detección del Microburst, ya que conociendo las estructuras típicas del campo de presiones, temperaturas y velocidades del fenómeno, puede analizarse cuáles son las más características para, a través de ellas, detectar la presencia, localización e intensidad de este fenómeno meteorológico.

3.2.2.- HIPOTESIS QUE RIGEN EL MODELO FISICO

Para que sea posible llegar, a partir de las ecuaciones más generales que analizan el comportamiento del movimiento fluido, a un sistema de ecuaciones que sea apto para su tratamiento mediante simulación numérica, es preciso realizar una serie de hipótesis que permitan el tratamiento de la información.

Estas hipótesis de partida pueden clasificarse en tres grandes áreas:

- las referidas al comportamiento de la atmósfera,
- las referidas a la representación de los fenómenos meteorológicos que dan lugar al Microburst, y,
- las referidas a las condiciones iniciales y de contorno necesarias para plantear el método numérico utilizado en la resolución de las ecuaciones que estudian el fenómeno.

A continuación se exponen detallada y razonadamente las hipótesis para el planteamiento del problema:

a) La atmósfera sólo tiene un componente: aire inerte

En la parte correspondiente al estudio teórico del Microburst se concluyó que para que se produzca el desarrollo del fenómeno es preciso la existencia de una precipitación. Dado que el objetivo de la simulación es obtener el campo de velocidades de un Microburst típico en las distintas fases de su desarrollo, se tendrá en cuenta la presencia del agua

simulando sus efectos sobre el aire tal como se ha determinado anteriormente. El considerar como único componente el aire no supone fundamentalmente ninguna limitación, ya que en las condiciones de presiones y temperaturas a las que se desarrolla el experimento, que son las condiciones atmosféricas a baja altura, el aire es inerte.

b) El aire se comporta como gas perfecto

Esta hipótesis es aceptada universalmente en todos los problemas de mecánica de fluidos que afectan al aire en condiciones normales. Así pues, ya que en este estudio el aire se encontrará en las condiciones de presiones y temperaturas habituales al nivel de la superficie terrestre y las aplicaciones se harán sobre grandes volúmenes, puede utilizarse la ecuación de estado referida a la unidad de masa

$$\frac{P}{\rho} = RT$$

El calor específico a volumen constante, C_v , depende de la temperatura, aumentando con ella, pero su variación solo es apreciable cuando la temperatura varía sustancialmente. Por ello se considera aceptable suponerlo constante para el estudio de estos flujos de aire y tomando como valor

$$C_v = 718 \frac{m^2}{s^2K}$$

c) El aire es un fluido no viscoso

Esta hipótesis permite obtener un sistema de ecuaciones válido para su tratamiento mediante simulación. El valor de los términos debidos a la viscosidad en la ecuación de conservación de la cantidad de movimiento para el caso en estudio son despreciables, debido a que el aire es un fluido con valores muy pequeños de viscosidad. Además teniendo en cuenta que el tamaño de la rejilla en el que se va a descomponer el dominio en estudio es del orden de los 100 m de lado, se puede considerar que la influencia de las fuerzas superficiales son despreciables respecto a las fuerzas másicas que dependen del volumen. Por tanto, las variaciones de la velocidad del aire se deben a las diferencias de presión entre unas regiones y otras. Al considerar despreciable los términos debidos a la viscosidad no se tiene en cuenta el efecto de frenado que sufren las masas de aire que se desplazan a nivel de la superficie terrestre por estar en contacto con ésta.

d) El coeficiente de conductividad térmica del aire es constante

El coeficiente de conductividad del aire, K , es función de la temperatura, siendo valores típicos los siguientes:

$$K_{(T=0^{\circ}\text{C})} = 0.02088 \text{ Kcal/hora m }^{\circ}\text{C}$$

$$K_{(T=100^{\circ}\text{C})} = 0.02536 \text{ Kcal/hora m }^{\circ}\text{C}$$

lo que indica que el coeficiente de conductividad térmica para el aire varía muy lentamente con la temperatura. Dado que el fenómeno, por lo expuesto con anterioridad, se desarrolla a temperaturas típicas al nivel de superficie en la atmósfera y estimando que la diferencia de temperatura entre los márgenes de simulación del fenómeno no es mayor de 25°C, puede suponerse que el valor de K es constante y toma el valor correspondiente a una temperatura de 20°C.

$$K_{(T=20^{\circ}\text{C})} = 0.0225 \text{ Kcal/hora m}^{\circ}\text{C} = 0.02612 \text{ julios/sg m}^{\circ}\text{C}$$

e) Bidimensionalidad del fenómeno del Microburst

Puesto que como ya se definió anteriormente el fenómeno del Microburst presenta simetría radial, y teniendo en cuenta que las condiciones atmosféricas donde se desarrolla el mismo no perturban el esquema planteado, podemos suponer que, sin perder precisión en los resultados, el fenómeno puede considerarse bidimensional.

f) El valor de la aceleración de la gravedad es constante

Cuando se trabaja con pequeñas masas de fluido que están a nivel del suelo, es un hecho normalmente aceptado que el valor de la aceleración de la gravedad es constante. Pero cuando el dominio fluido que vamos a estudiar va a tener varios kilómetros de altura debemos plantearnos si este criterio sigue siendo válido. Planteando la expresión:

$$\frac{g_h}{g_0} = \frac{R_T^2}{(R_T + h)^2}$$

donde h es la altura desde el nivel del mar, g_0 el valor de la aceleración de la gravedad a nivel de mar y R_T el radio de la tierra, se tiene que para variaciones de altura entre nivel del suelo y una altitud de 5.000 m. es

$$\frac{g_{5000}}{g_0} = 0.998$$

que es una variación lo suficientemente pequeña como para suponer que no va a afectar al comportamiento del fenómeno . La anchura del dominio a estudiar va a ser también como máximo de 5.000 m , y dado que el perímetro de la Tierra es de unos 41.000 km, podemos igualmente considerar despreciable el efecto de curvatura de la superficie terrestre, y por tanto suponer que todas las líneas verticales desde el suelo son paralelas entre sí, con lo que el vector gravedad tiene la misma dirección en todos los puntos del dominio.

3.2.3.- ECUACIONES FUNDAMENTALES QUE GOBIERNAN EL FENOMENO DEL MICROBURST

Entre los diversos métodos matemáticos que pueden utilizarse para analizar el movimiento de los fluidos, se va a usar el análisis diferencial, que consiste en aplicar las leyes básicas de conservación a un volumen de control infinitesimal, lo que nos proporciona las ecuaciones diferenciales básicas del movimiento de los fluidos. En su forma analítica estas ecuaciones tienen dificultades de solución, pero mediante técnicas de análisis numérico en las que se sustituyen las derivadas parciales por relaciones algebraicas en un número finito de puntos del campo fluido, pueden ser resueltas mediante simulación numérica utilizando sistemas informáticos.

Así pues, se parte de las ecuaciones más generales que determinan el comportamiento de un fluido para, mediante el establecimiento de las particularizaciones y simplificaciones adecuadas, llegar a las ecuaciones concretas que serán utilizadas para la simulación numérica del fenómeno Microburst.

a) Ecuación de continuidad

La ecuación de conservación de la masa, expresa que la suma de las masas entrantes y salientes por unidad de volumen en la unidad de tiempo es igual a la variación de la densidad por unidad de tiempo. La expresión en su forma vectorial es:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \mathbf{v}) = 0 \quad (3.1)$$

y desarrollando el operador gradiente queda:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w) = 0 \quad (3.2)$$

donde u, v, w son las componentes del vector velocidad \mathbf{V} según los ejes coordenados x, y, z .

Esta ecuación es válida sea el flujo estacionario o no, viscoso o sin fricción, compresible o incompresible.

b) Ecuación de conservación de la cantidad de movimiento

En esta ecuación del equilibrio dinámico, se considera que la única fuerza másica que actúa es la gravitatoria y que las fuerzas de superficie debidas a los esfuerzos en las caras de las superficies de control, son la suma del efecto de la presión hidrostática y de los esfuerzos viscosos, τ_{ij} , que aparecen en el movimiento a la vez que los gradientes de velocidad, con lo que se tiene:

$$\rho \mathbf{g} - \nabla p + \nabla \tau_{ij} = \rho \frac{d\mathbf{v}}{dt} \quad (3.3)$$

donde la aceleración de una partícula fluida viene expresada en la forma

$$\frac{d\mathbf{V}}{dt} = \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + u \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial x} + v \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial y} + w \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial z} \quad (3.4)$$

La complejidad de la ecuación vectorial es evidente, ya que cada una de sus componentes contiene varios sumandos no lineales de forma que representada en forma explícita se tiene:

$$\rho g_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} = \rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right)$$

$$\rho g_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} = \rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right)$$

$$\rho g_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} = \rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right)$$

(3.5)

Ahora bien, no podemos considerar el aire como fluido incompresible, porque, aunque el fenómeno se va a desarrollar a velocidades relativamente bajas y teniendo en cuenta que con el criterio de compresibilidad basado en el número de Mach (*) se podría suponer el fluido incompresible para $M < 0.5$, hay que tener en cuenta que se va a representar un fenómeno de dimensiones kilométricas, tanto en longitud como, y esto es lo verdaderamente importante, en altura. En realidad este es el sentido de la simulación, ya que sabemos que la masa de aire que

(*) Número de Mach $M = V/c$ definido como la relación entre la velocidad del fluido, V , en un punto y la del sonido, c , en ese punto.

da lugar en su descenso al Microburst, debe su movimiento a tener mayor densidad que las masas de aire colindantes. Por tanto vamos a considerar el flujo no viscoso como se indicó en las hipótesis previas, con lo cual el tensor de esfuerzos viscosos será nulo y se tiene la correspondiente ecuación de Euler en forma vectorial:

$$\rho \mathbf{g} - \nabla p = \rho \frac{d\mathbf{V}}{dt} \quad (3.6)$$

que desarrollada en sus tres componentes queda:

$$\begin{aligned} \rho g_x - \frac{\partial p}{\partial x} &= \rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) \\ \rho g_y - \frac{\partial p}{\partial y} &= \rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) \\ \rho g_z - \frac{\partial p}{\partial z} &= \rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (3.7)$$

c) Ecuación de conservación de la energía

Tomando como elemento de control un volumen fijo infinitesimal $dx \, dy \, dz$ de la masa de fluido que evoluciona, se tiene que la ecuación de conservación de la energía viene dada por:

$$\dot{Q} - \dot{W} = \left[\frac{\partial}{\partial t} (\rho e) + \frac{\partial}{\partial x} (\rho u \zeta) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho v \zeta) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho w \zeta) \right] dx \, dy \, dz \quad (3.8)$$

siendo:

$$\zeta = e + \frac{p}{\rho} \quad (3.9)$$

donde e , representa la energía interna específica de la unidad de masa expresada por:

$$e = \hat{u} + \frac{1}{2} (\mathbf{v})^2 + gz \quad (3.10)$$

y \hat{u} es la energía interna molecular específica.

La ecuación (3.8) queda reducida a:

$$\dot{Q} - \dot{W} = \left(\rho \frac{de}{dt} + \mathbf{v} \cdot \nabla p \right) dx dy dz \quad (3.11)$$

los términos del lado izquierdo de la ecuación representan el flujo de calor \dot{Q} y trabajo \dot{W} por unidad de tiempo debido a los esfuerzos viscosos, pero como no se consideran los efectos viscosos por las hipótesis de planteamiento prescindiremos de este último término.

Respecto al flujo de calor \dot{Q} se considerará únicamente la conducción de calor a través de las caras del elemento, así pues no se tendrá en cuenta las fuentes internas de calor que podrían aparecer, por ejemplo, en una reacción química o nuclear. Teniendo en cuenta lo anteriormente expuesto resulta

$$\dot{Q} = - \nabla \cdot \mathbf{q} dx dy dz \quad (3.12)$$

siendo \mathbf{q} el vector flujo de calor por unidad de área, que a su vez aplicando la ley de Fourier de la conducción del calor dada por la ecuación

$$\mathbf{q} = - k \nabla T \quad (3.13)$$

donde k representa la conductividad térmica se llega a:

$$\dot{Q} = \nabla(k \nabla T) dx dy dz \quad (3.14)$$

y sustituyendo convenientemente, se obtiene la ecuación diferencial de la energía en la forma:

$$\rho \frac{de}{dt} + \nabla(p\mathbf{v}) = \nabla(k \nabla T) \quad (3.15)$$

Una forma más útil para el tratamiento de la ecuación diferencial de la energía, es aquella en la que no aparecen explícitamente las energías cinética y potencial, de forma que multiplicando escalarmente por \mathbf{v} la ecuación de la cantidad de movimiento resulta:

$$\rho \frac{d\hat{u}}{dt} + p(\nabla \cdot \mathbf{v}) = \nabla(k \nabla T) \quad (3.16)$$

Ecuación válida para fluidos newtonianos en condiciones de flujo no estacionario, compresible y conductor del calor, pero sin viscosidad. Puesto que como ya se ha explicado anteriormente el valor del coeficiente de conductividad térmica del aire es prácticamente constante se llega finalmente a la forma de la expresión:

$$\rho \frac{d\hat{u}}{dt} + p(\nabla \cdot \mathbf{v}) = k(\nabla)^2 T \quad (3.17)$$

d) Sistema de ecuaciones para el estudio del fenómeno

Las ecuaciones que se han manejado hasta este momento son:

Continuidad:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \mathbf{V}) = 0$$

Cantidad de movimiento:

$$\rho \mathbf{g} - \nabla p = \rho \frac{d\mathbf{V}}{dt}$$

Energía:

$$\rho \frac{d\hat{u}}{dt} + p (\nabla \cdot \mathbf{V}) = k (\nabla)^2 T$$

Estas tres ecuaciones contienen cinco incógnitas, la densidad ρ , la velocidad \mathbf{V} (tridimensional), la presión p , la energía interna \hat{u} y la temperatura T . Así pues se necesitan dos relaciones adicionales para completar el sistema de ecuaciones, tales como las ecuaciones de estado.

Para un gas perfecto, con calores específicos constantes se tiene:

$$p = \rho RT \quad (3.18)$$

$$\hat{u} = \int c_v dT = c_v T + cte \quad (3.19)$$

Esta última relación llevada a la ecuación de la energía nos permite eliminar la variable correspondiente a la energía interna molecular

específica cuyo interés no es relevante para el estudio que se está desarrollando.

Al tratar las diferentes derivadas que aparecen en el sistema propuesto, hay que tener en cuenta que una función fluida cualquiera depende de cuatro variables x, y, z, t , ya que el valor de la función tiene dependencia de la posición en el espacio y del tiempo, por lo tanto la derivada total consta de cuatro términos.

Siendo ϕ una función fluida cualquiera, su derivada es:

$$\frac{d\phi}{dt} = \frac{\partial\phi}{\partial t} + \frac{\partial\phi}{\partial x} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial\phi}{\partial y} \frac{dy}{dt} + \frac{\partial\phi}{\partial z} \frac{dz}{dt}$$

como los cambios infinitesimales de la posición de una partícula fluida están directamente relacionados con la velocidad local

$$dx = u dt \quad , \quad dy = v dt \quad , \quad dz = w dt$$

resulta:

$$\frac{d\phi}{dt} = \frac{\partial\phi}{\partial t} + \left(u \frac{\partial\phi}{\partial x} + v \frac{\partial\phi}{\partial y} + w \frac{\partial\phi}{\partial z} \right)$$

El primer término del segundo miembro es la denominada derivada local y se anula cuando el flujo es estacionario, es decir independiente del tiempo. Los siguientes tres términos representan la derivada convectiva que aparece cuando la partícula fluida se desplaza a través de regiones en las que varía la velocidad. Utilizando el operador gradiente obtenemos una expresión general para la derivada total en un sistema euleriano que puede

ser aplicado a cualquier propiedad fluida ya sea escalar o vectorial

$$\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \quad (3.20)$$

Desarrollando los operadores tanto gradiente como laplaciano que aparecen en las ecuaciones expuestas hasta este momento y separando la ecuación de la cantidad de movimiento en sus tres componentes vectoriales, además de considerar la condición de bidimensionalidad y situando los ejes de referencia de manera que el eje OX tiene la dirección de la horizontal y sentido hacia la derecha, y el eje OZ según la dirección de la vertical con el sentido positivo hacia arriba, queda el siguiente sistema de ecuaciones:

Continuidad:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\rho u) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho w) = 0 \quad (a)$$

Cantidad de movimiento:

$$-\frac{\partial p}{\partial x} = \rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad (b)$$

$$-\rho g - \frac{\partial p}{\partial z} = \rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) \quad (c) \quad (3.21)$$

Energía:

$$\rho C_v \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) + p \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (d)$$

Ecuación de estado:

$$p = \rho R T \quad (e)$$

Sistema de ecuaciones diferenciales no lineales para cuya solución deben imponerse unas condiciones iniciales (distribuciones espaciales conocidas para cada variable) y del contorno que encierra el flujo en cada instante.

3.3. SOLUCIÓN DEL SISTEMA DE ECUACIONES QUE RIGEN EL FENÓMENO DEL MICROBURST

3.3.1.- RESOLUCIÓN NUMÉRICA

Dentro de los métodos numéricos usados en la simulación de este tipo de problemas en la mecánica de fluidos, se va a utilizar un método en diferencias finitas ya que sus mallados se adaptan mucho más adecuadamente a las siluetas de los contornos del problema en estudio. Los métodos numéricos con diferencias finitas no dan las funciones matemáticas que son solución al problema en su forma analítica, pero sí se obtienen dichas funciones estimando los valores que toman para una serie de valores discretos de las variables de la función. Evidentemente la precisión depende del número de puntos en los que se quiera calcular el valor de la función. El dominio fluido a estudiar se descompone en partes que se pueden denominar zonas, elementos de fluido o celdas, que es el término que se usará de aquí en adelante. Las celdas son los volúmenes definidos por una malla de puntos que marca las fronteras entre las celdas. Cada celda se corresponde con un punto en el que se conoce o se va a calcular los valores que toma la velocidad y las variables termodinámicas. En general el punto donde el algoritmo numérico estima los valores de las funciones se considera que es el centro de la celda en estudio. Estos valores, dada la continuidad de las funciones y el tamaño relativamente pequeño de las celdas, se consideran constantes para todo el fluido que está contenido en esa celda.

Por las mismas razones, en el estudio de fenómenos dinámicos en los que se considera el tiempo como una variable más, dicha variable también se ha de

discretizar. En consecuencia, solamente se conocerá el valor de las funciones en unas determinadas localizaciones y en unos determinados instantes. La magnitud de los intervalos temporales entre esos instantes se designa como paso temporal o simplemente paso.

Así pues la precisión del algoritmo dependerá aparte de su propia naturaleza, del tamaño de las celdas y de la magnitud del paso temporal. Es muy importante fijar estas características para estudiar adecuadamente el problema de que se trate ya que el tiempo de cálculo es proporcional al producto de tres términos:

- el número de celdas, el número de pasos y el tiempo que requiere el algoritmo para resolver el sistema de ecuaciones para una celda.

Para simular un fenómeno no estacionario, además de las condiciones de contorno del problema deben incluirse las condiciones iniciales, es decir, deben conocerse las distribuciones espaciales de cada variable cuando se empieza a representar el fenómeno:

$$\rho, V, p, T = f(x, z) \quad \text{en} \quad t = 0$$

en la práctica solo se necesitará la distribución espacial de dos variables termodinámicas, ya que la distribución espacial del resto se obtiene de las ecuaciones de estado.

El algoritmo numérico seguirá el siguiente proceso iterativo de integración. A partir de las condiciones iniciales se dará un valor inicial a las variables p , T , ρ , V para cada celda en el instante t_0 . A continuación calculará las derivadas parciales respecto a x e y de cada una de las funciones fluidas en cada uno

de los centros de las celdas, y estimará con ellas el valor de las derivadas parciales con respecto al tiempo de las variables termodinámicas a partir del sistema de ecuaciones (3.21).

Este sistema de ecuaciones debe aplicarse para cada paso, en todas las celdas en que se haya dividido el dominio fluido. Estimadas las derivadas temporales, se calcularán los nuevos valores de las variables termodinámicas en esos puntos transcurrido el paso temporal correspondiente al instante t_j . Estos valores serán a su vez las condiciones iniciales en el siguiente paso que calculará los datos referidos al instante t_2 y así sucesivamente.

Puesto que la discretización del proceso exige realizar mallados que determinen las celdas en estudio considerando el fenómeno bidimensional, se utilizarán los subíndices i, j para identificar cada una de las celdas, a partir de su posición. Una secuencia de celdas contiguas se indicará con los subíndices $i - 1, i, i + 1, \dots$ si están colocadas horizontalmente, y por los subíndices $j - 1, j, j + 1, \dots$ si están situadas verticalmente. Las superficies que separan estas celdas se indicarán respectivamente por los subíndices $i - 1/2, i + 1/2, j - 1/2, j + 1/2, \dots$

Así pues la celda (i, j) se corresponde con la posición del punto de coordenadas (x_i, y_j) , con lo que la anchura y altura de la celda viene dada por las siguientes relaciones:

$$\begin{aligned} \Delta x_i &= x_{i+1/2} - x_{i-1/2} \\ \Delta y_j &= y_{j+1/2} - y_{j-1/2} \end{aligned} \quad (3.22)$$

Para el tiempo se usará el superíndice n , con lo que una secuencia de pasos viene indicada por los superíndices $n - 1, n, n + 1, \dots$ que se corresponden con los tiempos $t^{n-1}, t^n, t^{n+1}, \dots$. La separación entre estos instantes en los que el algoritmo calcula la función es lo que se ha denominado *paso*, que se indica como h y que puede ser constante o variable dependiendo del algoritmo utilizado:

$$h = t^n - t^{n-1} \quad (3.23)$$

En esta memoria se utilizará el símbolo h por mayor simplicidad en la representación simbólica. Así pues indicando por ϕ cualquier función fluida continua, la expresión $\phi_{i,j}^n$ indica el valor de la función ϕ en la celda (i,j) y en el paso número n .

3.3.2.- MALLADO ESPACIAL Y TEMPORAL

La elección del mallado tiene gran importancia, ya que está perfectamente comprobado que se puede ganar más en la precisión de las soluciones, con un mallado bien elegido que aumentando el orden de los algoritmos de integración (Scheid et al., 1991). La elección óptima del mallado más efectivo para cada caso depende de la complejidad geométrica del dominio fluido y de la complejidad propia de la estructura del flujo en estudio. Los tipos de mallado más usuales son los mallados eulerianos y los mallados lagrangianos. En un mallado euleriano las celdas se mantienen fijas en sus posiciones y el fluido en su movimiento pasa de unas a otras. En un mallado lagrangiano las celdas se mueven con el fluido de manera que el fluido no atraviesa las paredes de la celda. Desde el punto de vista del método de resolución numérica, el mallado lagrangiano supone una gran simplificación de las ecuaciones, pero tiene como enorme desventaja el aumento de la complejidad geométrica del dominio porque los elementos de fluido pueden llegar a envolverse unos en otros.

El tipo de mallado euleriano regular de separación constante es muy útil, debido a que las celdas pueden ser rectangulares o triángulos definidos por una red de líneas rectas paralelas entre sí y cuya separación es constante. Además estos mallados se pueden perfeccionar en las zonas donde se precise, adaptando la separación entre las líneas, bien acercándolas o bien afinando el mallado subdividiendo las celdas en otras más pequeñas contenidas en ellas.

En la *Figura 3.1a* se muestran diferentes tipos de mallados eulerianos, apreciándose que las redes con afinamientos son útiles si pueden preverse las

regiones con mayores gradientes de la función en estudio. Para el caso de los mallados lagrangianos que se indican en la *Figura 3.1b* se tienen redes cuadrilaterales, triangulares o mixtas. Las paredes entre las celdas ya no pueden ser ortogonales, lo que complica excesivamente tanto las ecuaciones como los algoritmos. Como estos mallados cambian según se mueva el fluido, la geometría de las celdas puede distorsionarse muy rápidamente en zonas de cizalladura o torbellinos.

Para el fenómeno que tenemos en estudio, dado que no puede preverse en qué zonas podrían existir fuertes gradientes, ni van a producirse discontinuidades dado que no hay interfase entre distintos fluidos, se utilizará un mallado euleriano regular rectangular de separación constante. Por tanto las dimensiones Δx e Δy son constantes para todas las celdas y para todos los instantes. La altura y anchura de las celdas coincide con las separaciones vertical y horizontal entre los centros geométricos de las celdas, que son los puntos donde se estiman los valores de las funciones en estudio. Al no cambiar las celdas en cada paso, los valores de las funciones obtenidas para cada celda son los valores iniciales de esas funciones de dicha celda y para el siguiente paso.

En relación con el mallado temporal se pueden optimizar los algoritmos aumentando o disminuyendo el paso. La disminución del paso es conveniente realizarla en los períodos de tiempo donde es interesante conocer con más precisión como evolucionan las funciones en estudio, o también en los períodos donde las funciones varían más rápidamente, con el objeto de que los errores inevitables del algoritmo, debido a las aproximaciones de las derivadas parciales, no se hagan excesivamente grandes. Más adelante se indicará tanto el tamaño

concreto de las celdas como el paso temporal utilizado en la simulación.

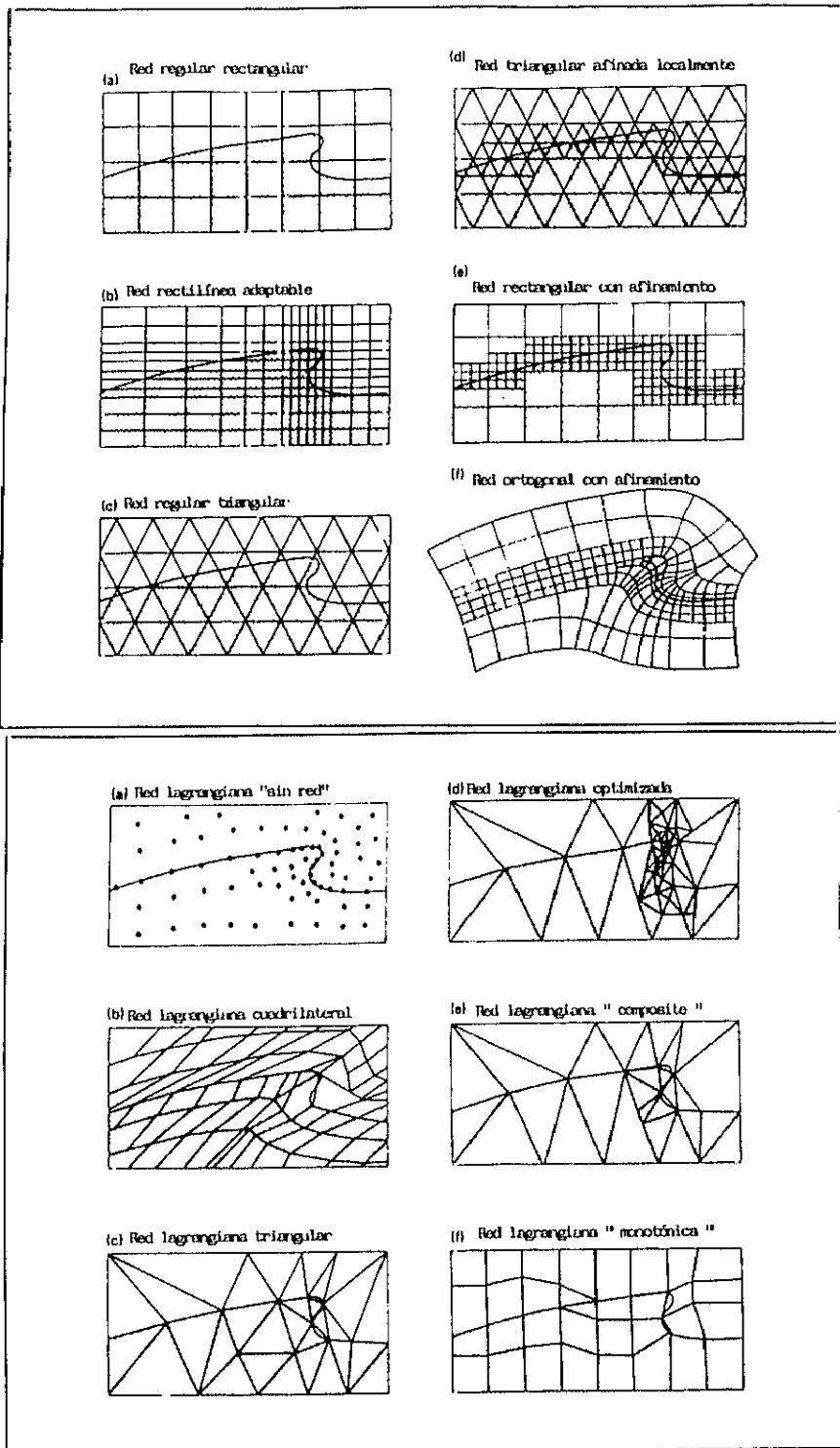


Fig. 3.1 :Diversos tipos de mallado espacial.
a) mallado euleriano b) mallado lagrangiano

3.3.3.- INTEGRACIÓN DEL SISTEMA DE ECUACIONES. ELECCIÓN DEL MÉTODO DE RESOLUCIÓN

Conocida una distribución espacial de presiones, densidades, temperaturas y velocidades, las incógnitas del sistema de ecuaciones que rigen el fenómeno del Microburst son las derivadas con respecto al tiempo de las variables fluidas, por lo que puede ser considerado como un sistema de ecuaciones diferenciales no lineales de primer orden.

El algoritmo numérico que permita resolver este sistema debe verificar que sea estable y convergente. Un método estable es aquel para el cual el error relativo permanece acotado entre unos valores aceptables. El error absoluto es la suma de los errores de redondeo, de truncamiento y el debido a la naturaleza del propio algoritmo. Un método convergente es aquel que cuando se refina continuamente al usarse un número mayor de términos en la serie o hacer los intervalos entre argumentos más pequeños, produce una sucesión de soluciones aproximadas que convergen hacia la solución exacta. No es sencillo establecer la convergencia de un algoritmo teóricamente, ya que algunos métodos son convergentes para unas ecuaciones pero no lo son para otras.

Los métodos de Taylor, Runge-Kutta y algunos de tipo predictor - corrector son convergentes bajo circunstancias apropiadas. Como la solución de ecuaciones diferenciales es uno de los principales objetivos del análisis numérico se han desarrollado una variedad de métodos para la solución aproximada de este problema. A continuación se analizan brevemente distintos métodos disponibles para la resolución de sistemas de ecuaciones diferenciales no lineales

tales como el que modeliza el fenómeno del Microburst en la simulación efectuada.

Estos métodos pueden clasificarse en tres categorías:

a) Métodos de un paso

Estos algoritmos obtienen el valor de la variable ϕ_{n+1} cuando se conoce su valor en el punto ϕ_n y el tamaño del paso. En su forma general se tiene:

$$\phi_{n+1} = \phi_n + h F(t_n, \phi_n, h) \quad (3.24)$$

donde F es una función que nos aproxima la derivada y puede evaluarse de dos maneras. Una de ellas es a partir de un desarrollo en serie de Taylor en el punto t^n con lo que resulta:

$$\phi_{n+1} = \phi_n + h \frac{\partial \phi_n}{\partial t} + h^2 \frac{\partial^2 \phi_n}{\partial t^2} + \dots \quad (3.25)$$

y otra es realizando aproximaciones de la fórmula integral:

$$\phi_{n+1} = \phi_n + \int_{t_n}^{t_{n+1}} F[t, \phi(t)] dt \quad (3.26)$$

en cuyo caso la aproximación de la función F tiene forma polinómica o exponencial.

b) Métodos de pasos múltiples

Estos algoritmos requieren el conocimiento de más de un punto y un tamaño del paso h . En términos generales se derivan usando la definición de integral definida y la primera derivada se aproxima por interpolación polinomial.

c) Métodos iterativos de un paso

Requieren solamente un punto y sucesivamente se va dividiendo el intervalo por la mitad repitiendo la iteración hasta que los resultados sean convergentes.

Del estudio de los distintos métodos y en función de las características del problema en estudio se utilizarán métodos de un paso que se adaptan bien para simulaciones grandes.

Los algoritmos pueden clasificarse en:

a) Explícitos

Cuando el resultado ϕ_{n+1} se obtiene a partir de valores definidos explícitamente.

b) Implícitos

Cuando el resultado ϕ_{n+1} se obtiene a partir de valores definidos mediante predicción.

c) Predictor - corrector

Cuando el algoritmo emplea sucesivamente expresiones implícitas y explícitas.

Los métodos de Runge - Kutta perfectamente contrastados permiten obtener una precisión de mayor orden sin tener que recurrir a derivadas también de mayor orden. Se basan en evaluar la función $f(\phi, t)$ en más de un punto dentro del intervalo marcado por el paso h en lugar de realizar el cálculo de derivadas de orden superior.

La función F que se tiene para aproximar la derivada se expresa como media ponderada de las derivadas primeras obtenidas numéricamente en el intervalo (t_n, t_{n+1}) .

Por tanto la forma general de un algoritmo Runge-Kutta de orden R es:

$$\phi_{n+1} = \phi_n + h \sum_{r=1}^R C_r K_r \quad (3.27)$$

determinándose los coeficientes K_r de la forma:

$$K_r = f(t_n + ha_r, \phi_n + h \sum_{s=1}^R b_{rs} K_s) \quad (3.28)$$

$$r = 1, 2, \dots, R$$

$$s = 1, 2, \dots, R$$

donde los grupos $\{a_r\}$, $\{b_{rs}\}$ y $\{C_r\}$ son constantes sujetas a restricciones tales como:

$$\sum_{r=1}^R C_r = 1 \quad (3.29)$$

en donde cada valor de C_r indica en tanto por uno la importancia o peso de cada coeficiente K_r al estimar la derivada de la función en ese paso, y debido a ello la suma de todos los C_r debe ser igual a uno. Los valores de los coeficientes K_r representan las estimaciones de la derivada parcial en distintos puntos.

Las ecuaciones (3.27) y (3.28), dan algoritmos Runge - Kutta explícitos cuando todos los parámetros K usados como argumentos de F son calculados en un paso anterior, es decir cuando $b_{rs} = 0$ para todo $s \geq r$. Si esto no es así los algoritmos son implícitos. Los métodos Runge - Kutta implícitos son muy estables y precisos, describiéndose a continuación algunos de los algoritmos más usuales.

i) Método Runge - Kutta clásico:

$$\begin{aligned}K_1 &= f(t_n, \phi_n) \\K_2 &= f\left(t_n + \frac{1}{2} h, \phi_n + \frac{1}{2} h K_1\right) \\K_3 &= f\left(t_n + \frac{1}{2} h, \phi_n + \frac{1}{2} h K_2\right) \\K_4 &= f(t_n + h, \phi_n + h K_3) \\ \phi_{n+1} &= \phi_n + \frac{h}{6} (K_1 + 2K_2 + 2K_3 + K_4)\end{aligned}\tag{3.30}$$

ii) Método Runge - Kutta mejorado:

$$\begin{aligned}K_1 &= f(t_n, \phi_n) \\K_2 &= f\left(t_n + \frac{1}{3} h, \phi_n + \frac{1}{3} h K_1\right) \\K_3 &= f\left(t_n + \frac{2}{3} h, \phi_n - \frac{1}{3} h K_1 + hK_2\right) \\K_4 &= f(t_n + h, \phi_n + hK_1 - hK_2 + hK_3) \\ \phi_{n+1} &= \phi_n + \frac{h}{8} (K_1 + 3K_2 + 3K_3 + K_4)\end{aligned}\tag{3.31}$$

iii) Método Runge - Kutta Gill:

$$\begin{aligned}
 K_1 &= f(t_n, \phi_n) \\
 K_2 &= f\left(t_n + \frac{1}{2}h, \phi_n + \frac{1}{2}hK_1\right) \\
 K_3 &= f\left(t_n + \frac{1}{2}h, \phi_n + \left(\frac{2-\sqrt{2}}{2\sqrt{2}}\right)hK_1 + \left(\frac{\sqrt{2}-1}{\sqrt{2}}\right)hK_2\right) \\
 K_4 &= f\left(t_n + h, \phi_n - \frac{1}{\sqrt{2}}hK_2 + \left(\frac{\sqrt{2}+1}{\sqrt{2}}\right)hK_3\right) \\
 \phi_{n+1} &= \phi_n + \frac{h}{6}\left(K_1 + 2\left(\frac{\sqrt{2}-1}{\sqrt{2}}\right)K_2 + 2\left(\frac{\sqrt{2}+1}{\sqrt{2}}\right)K_3 + K_4\right)
 \end{aligned} \tag{3.32}$$

El método Runge - Kutta mejorado es especialmente útil en los estudios de simulación de problemas de mecánica de fluidos (Morán, 1984; Oran y Boris, 1987; Scheid y Constanzo, 1991).

3.3.4.- ESTUDIO SOBRE LAS DERIVADAS PARCIALES ESPACIALES

En la simulación realizada se procede a calcular las derivadas temporales a partir de una distribución conocida de presiones, densidades, temperaturas y velocidades. En el sistema de ecuaciones las incógnitas son, por tanto, las derivadas temporales, mientras que las derivadas espaciales serán sustituidas por unas funciones aproximadas.

La definición de la derivada de una función continua ϕ con respecto a una variable z es:

$$\frac{d\phi(z)}{dz} = \lim_{\Delta z \rightarrow 0} \frac{\phi(z+\Delta z) - \phi(z)}{\Delta z} = \lim_{\Delta z \rightarrow 0} \frac{\phi(z) - \phi(z-\Delta z)}{\Delta z} \quad (3.33)$$

claro está que en las expresiones en diferencias finitas no se puede calcular el límite porque no se dispone de los valores continuos de la función para hacer que el incremento de la variable tienda a cero y, en consecuencia, el paso Δz debe tener un valor finito con lo que se debe aproximar la derivada utilizando los valores discretos disponibles. Una aproximación en diferencias finitas de la llamada derivada de primer orden hacia adelante es:

$$\lim_{\Delta z \rightarrow 0} \frac{\phi(z+\Delta z) - \phi(z)}{\Delta z} \approx \frac{\phi_{j+1} - \phi_j}{z_{j+1} - z_j} \quad (3.34)$$

admitiéndose que la aproximación numérica se acerca a la analítica si los valores de Δz se toman suficientemente pequeños. Cuando la función es continua y varía suavemente, el uso de formulaciones de mayor orden dan soluciones más

precisas.

Las derivadas en diferencias finitas se expresan según los casos de la siguiente forma:

Primer orden (diferencias adelantadas).

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} \approx \frac{\phi_{j+1} - \phi_j}{\Delta z}$$

Primer orden (diferencias retrasadas).

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} \approx \frac{\phi_j - \phi_{j-1}}{\Delta z} \quad (3.35)$$

Segundo orden (diferencias centradas).

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} \approx \frac{\phi_{j+1} - \phi_{j-1}}{2\Delta z}$$

Para la derivada segunda se tiene una expresión de segundo orden con diferencias centradas que se obtiene a partir de la media aritmética de las aproximaciones anteriores:

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} \approx \frac{\phi_{j+1} - 2\phi_j + \phi_{j-1}}{\Delta z^2} \quad (3.36)$$

Aumentar el orden de precisión, significa implicar en las expresiones de las derivadas valores de la función en un mayor número de celdas. Para los casos en los que las funciones no varían suavemente sino que tienen una estructura

más fina que la del mallado, los métodos de mayor orden pueden ser menos precisos que los de menor orden, ya que las aproximaciones de mayor orden requieren información de celdas más lejanas de la red. Como en el problema objeto de este estudio de la simulación del fenómeno Microburst las derivadas no varían bruscamente, se utilizarán métodos de segundo orden, con lo que las derivadas espaciales tendrán la siguiente estructura:

$$\frac{\partial}{\partial x} (\rho u) = \frac{\rho_{i+1,j} u_{i+1,j} - \rho_{i-1,j} u_{i-1,j}}{2\Delta x} \quad (3.37)$$

$$\frac{\partial}{\partial z} (\rho w) = \frac{\rho_{i,j+1} w_{i,j+1} - \rho_{i,j-1} w_{i,j-1}}{2\Delta z} \quad (3.38)$$

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{p_{i+1,j} - p_{i-1,j}}{2\Delta x} \quad (3.39)$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} = \frac{p_{i,j+1} - p_{i,j-1}}{2\Delta z} \quad (3.40)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{u_{i+1,j} - u_{i-1,j}}{2\Delta x} \quad (3.41)$$

$$\frac{\partial u}{\partial z} = \frac{u_{i,j+1} - u_{i,j-1}}{2\Delta z} \quad (3.42)$$

$$\frac{\partial w}{\partial x} = \frac{w_{i+1,j} - w_{i-1,j}}{2\Delta x} \quad (3.43)$$

$$\frac{\partial w}{\partial z} = \frac{w_{i,j+1} - w_{i,j-1}}{2\Delta z} \quad (3.44)$$

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{T_{i+1,j} - T_{i-1,j}}{2\Delta x} \quad (3.45)$$

$$\frac{\partial T}{\partial z} = \frac{T_{i,j+1} - T_{i,j-1}}{2\Delta z} \quad (3.46)$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{T_{i+1,j} - 2T_{i,j} + T_{i-1,j}}{\Delta x^2} \quad (3.47)$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{T_{i,j+1} - 2T_{i,j} + T_{i,j-1}}{\Delta z^2} \quad (3.48)$$

Sustituyendo en el sistema de ecuaciones, se consigue que éste quede sin más derivadas parciales que aquéllas que son las incógnitas, que posteriormente se determinarán despejando sus expresiones en las ecuaciones siguientes:

Continuidad:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \left(\frac{\rho_{i+1,j} u_{i+1,j} - \rho_{i-1,j} u_{i-1,j}}{2\Delta x} \right) + \\ + \left(\frac{\rho_{i,j+1} w_{i,j+1} - \rho_{i,j-1} w_{i,j-1}}{2\Delta z} \right) = 0 \end{aligned} \quad (a)$$

Cantidad de movimiento:

$$\begin{aligned} - \left(\frac{p_{i+1,j} - p_{i-1,j}}{2\Delta x} \right) = \\ = \rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{u_{i+1,j} - u_{i-1,j}}{2\Delta x} + w \frac{u_{i,j+1} - u_{i,j-1}}{2\Delta z} \right) \end{aligned} \quad (b)$$

(3.49)

$$\begin{aligned}
& - \rho g - \left(\frac{p_{i,j+1} - p_{i,j-1}}{2\Delta z} \right) = \\
& = \rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \left(\frac{w_{i+1,j} - w_{i-1,j}}{2\Delta x} \right) + w \left(\frac{w_{i,j+1} - w_{i,j-1}}{2\Delta z} \right) \right)
\end{aligned} \tag{c}$$

Energía:

$$\begin{aligned}
& \rho c_v \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \left(\frac{T_{i+1,j} - T_{i-1,j}}{2\Delta x} \right) + w \left(\frac{T_{i,j+1} - T_{i,j-1}}{2\Delta z} \right) \right) + \\
& + p \left(\frac{u_{i+1,j} - u_{i-1,j}}{2\Delta x} + \frac{w_{i,j+1} - w_{i,j-1}}{2\Delta z} \right) = \\
& = k \left(\left(\frac{T_{i+1,j} - 2T_{i,j} + T_{i-1,j}}{\Delta x^2} \right) + \left(\frac{T_{i,j+1} - 2T_{i,j} + T_{i,j-1}}{\Delta z^2} \right) \right)
\end{aligned} \tag{d}$$

(3.49)

Ecuación de estado:

$$p = \rho R T \tag{e}$$

en las cuatro primeras ecuaciones se tienen cuatro derivadas parciales con respecto al tiempo que son las de la densidad ρ , la temperatura T , y las dos componentes de la velocidad u y w , con lo que despejando las incógnitas resulta:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial \rho}{\partial t} = & - \left(\frac{\rho_{i+1,j} u_{i+1,j} - \rho_{i-1,j} u_{i-1,j}}{2\Delta x} \right) - \\
& - \left(\frac{\rho_{i,j+1} w_{i,j+1} - \rho_{i,j-1} w_{i,j-1}}{2\Delta z} \right)
\end{aligned} \tag{a}$$

(3.50)

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{-\left(\frac{p_{i+1,j} - p_{i-1,j}}{2\Delta x}\right)}{\rho} -$$

$$- u \left(\frac{u_{i+1,j} - u_{i-1,j}}{2\Delta x} \right) - w \left(\frac{u_{i,j+1} - u_{i,j-1}}{2\Delta z} \right)$$
(b)

$$\frac{\partial w}{\partial t} = \frac{-\rho g - \left(\frac{p_{i,j+1} - p_{i,j-1}}{2\Delta z}\right)}{\rho} -$$

$$- u \left(\frac{w_{i+1,j} - w_{i-1,j}}{2\Delta x} \right) - w \left(\frac{w_{i,j+1} - w_{i,j-1}}{2\Delta z} \right)$$
(c)

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k \left(\left(\frac{T_{i+1,j} - 2T_{ij} + T_{i-1,j}}{\Delta x^2} \right) + \left(\frac{T_{i,j+1} - 2T_{ij} + T_{i,j-1}}{\Delta z^2} \right) \right)}{\rho C_v} -$$

$$- p \left(\left(\frac{u_{i+1,j} - u_{i-1,j}}{2\Delta x} \right) + \left(\frac{w_{i,j+1} - w_{i,j-1}}{2\Delta z} \right) \right) -$$

$$- u \left(\frac{T_{i+1,j} - T_{i-1,j}}{2\Delta x} \right) - w \left(\frac{T_{i,j+1} - T_{i,j-1}}{2\Delta z} \right)$$
(d)

$$p = \rho R T$$
(e)

3.3.5.- DETERMINACIÓN DEL PASO TEMPORAL

Es difícil estimar cuál deberá ser el paso temporal adecuado para obtener los resultados más idóneos. Se tiene que tener en cuenta que un paso temporal grande supone un menor tiempo de cálculo para una misma duración del fenómeno, pero puede provocar que el algoritmo no sea convergente. Por el contrario, un paso temporal excesivamente pequeño hace, generalmente, al algoritmo convergente pero tiene el inconveniente de que, además de aumentar el tiempo necesario para cada simulación el error de acumulación aumenta y los resultados pueden quedar falseados.

En consecuencia, se adoptará un valor de paso temporal h constante durante toda la integración, teniendo en cuenta que si se comprueba que el algoritmo no es convergente para el tamaño de paso elegido, se variará éste adecuadamente para conseguir la convergencia exigida. Una comprobación simple, por ejemplo, si el paso h cumple la condición:

$$h \leq \frac{\Delta x}{|V|}$$

puede indicar si el algoritmo es convergente para un determinado paso, donde $|V|$ es la mayor velocidad presente en el sistema suponiendo que la anchura o altura de las celdas Δx es constante.

De las observaciones realizadas sobre el fenómeno Microburst (Hjelmfelt, 1988) se ha determinado que para un Microburst de tipo medio los valores de las velocidades máximas pueden encontrarse entre $15 - 25 \text{ m s}^{-1}$ y teniendo en cuenta que el tamaño de las celdas del mallado sea de 100 m , el paso temporal

adoptado para garantizar la convergencia del método será de 0.5 segundos, de acuerdo a la condición anterior.

3.3.6.- CONDICIONES INICIALES

Estas condiciones definen la situación en que se encuentra la atmósfera cuando se inicia el fenómeno del Microburst. Como ya se indicó cuando se procedió al estudio de la estructura del Microburst, se observan características atmosféricas típicas en el desarrollo de este fenómeno, lo que indica claramente que se requieren determinadas condiciones iniciales para que se produzca su evolución relacionadas con la intensidad de la precipitación, con los gradientes verticales de presión y temperatura, etc.

Mediante el proceso de simulación se comprobará la certeza de estos supuestos variando las condiciones iniciales en cada caso. En los diversos casos de estudio se supondrá que la atmósfera inicialmente está en equilibrio. Esto quiere decir que $V = 0$ en todos los puntos del dominio y que no hay inicialmente gradientes horizontales de presión, densidad o temperatura, es decir, el aire que inicialmente está a la misma altura, está también en el mismo estado termodinámico.

Con respecto a los gradientes verticales, se supone que el aire inicialmente tiene una variación vertical de temperatura y presión que sigue una ley politrópica de exponente n :

$$\frac{P}{\rho^n} = cte$$

La temperatura, por tanto, varía linealmente con la altura, siendo el

gradiente vertical de temperatura:

$$\frac{\partial T}{\partial h} = -\frac{n-1}{n} \frac{g}{R} \quad (3.51)$$

Se realizarán distintos supuestos variando el exponente de la transformación, de manera que se tengan en cuenta los posibles casos de atmósfera estable ($n \leq \gamma$) que comprende los casos de atmósfera isoterma, adiabática y normal, y los de atmósfera inestable ($n > \gamma$).

Para definir completamente la atmósfera inicial hay que reflejar también los valores concretos de, al menos, dos de las variables termodinámicas a una determinada altura. Se adoptarán valores de presión y temperatura a nivel del suelo en el inicio de un Microburst obtenidos de observaciones experimentales.

Los valores de las condiciones iniciales a nivel del suelo así como el coeficiente politrópico inicial de la atmósfera, serán tenidos en cuenta para que mediante las siguientes relaciones se calculen los valores de presión, densidad y temperatura en función de la altura:

$$p_h = p_0 \left(1 - \frac{n-1}{n} \frac{g \rho_0}{p_0} h \right)^{\frac{n}{n-1}} \quad (a)$$

$$\rho_h = \rho_0 \left(1 - \frac{n-1}{n} \frac{g \rho_0}{p_0} h \right)^{\frac{1}{n-1}} \quad (b)$$

$$T_h = T_0 - \frac{n-1}{n} \frac{g}{R} h \quad (c)$$

(3.52)

donde el subíndice 0 indica los valores al nivel del suelo.

De esta manera y durante el proceso de simulación, se darán valores iniciales a cada una de las celdas en que se haya dividido el dominio y también a las *celdas fantasma*.

3.3.7.- CONDICIONES DE CONTORNO

Debido a que el fenómeno que se está analizando no sigue un proceso estacionario, las condiciones a imponer al sistema de ecuaciones (3.21) se subdividen en condiciones iniciales y condiciones en el contorno del dominio fluido.

Las condiciones iniciales deben dar una distribución espacial de las variables fluidas de forma que para $t = 0$

$$\rho, V, p, T = f(x,z)$$

a partir de lo cual se pueden dar valores a las funciones fluidas en cada una de las celdas en que se ha descompuesto el dominio en estudio. Debe asegurarse claramente que las condiciones iniciales no estén en contradicción con las ecuaciones que el fluido ha de verificar.

Por otro lado las condiciones de frontera deben dar los valores, o las restricciones a los valores de las funciones, en el contorno del dominio que está siendo estudiado en todos los instantes de la simulación. Estas condiciones son necesarias incluso si se intentara representar un dominio infinito, ya que se considera como cuestión previa que el número de celdas ha de ser finito. En definitiva los resultados obtenidos de la simulación dependen en buena parte de como sea de consistente la manera en que se trate la influencia de las fronteras sobre el fluido.

a) Fronteras del dominio fluido en estudio

Se quiere representar un flujo descendente atmosférico, discretizado en un número indeterminado de celdas que forman una malla euleriana regular rectangular en similitud con el dominio fluido elegido que también tiene forma rectangular. El mallado estará fijo en el espacio, con lo que las fronteras también estarán fijas en el espacio. Por tanto el dominio en estudio va a estar limitado por cuatro fronteras rectas, paralelas dos a dos horizontal y verticalmente. Las condiciones de contorno serán las mismas a lo largo de cada lado, pero distintas entre sí, puesto que cada frontera representa unas condiciones diferentes.

Se ha indicado anteriormente que el Microburst aislado tiene simetría axial respecto a la vertical. Al representarlo en un dominio bidimensional cortando el flujo descendente por un plano que contiene al eje de simetría axial, esa simetría se transforma en simetría vertical. Simplificaremos el dominio a simular representando únicamente una de las dos mitades de la descendencia, ya que los valores de las funciones fluidas al otro lado del eje de simetría están determinados por el propio hecho de la simetría considerada. Por ello el eje de simetría coincide con el lado del lateral izquierdo del dominio. El lado inferior se hace coincidir evidentemente con la superficie del terreno, que teniendo en cuenta las dimensiones del desarrollo del Microburst en el estudio, se considera plana. Esta frontera se considera cerrada al flujo de masa. Los lados superior y lateral derecho separan al fluido del dominio considerado del resto de la atmósfera, y son por tanto fronteras abiertas.

En la *Figura 3.2* se representa un esquema del dominio fluido y sus contornos, representándose también la descendencia.

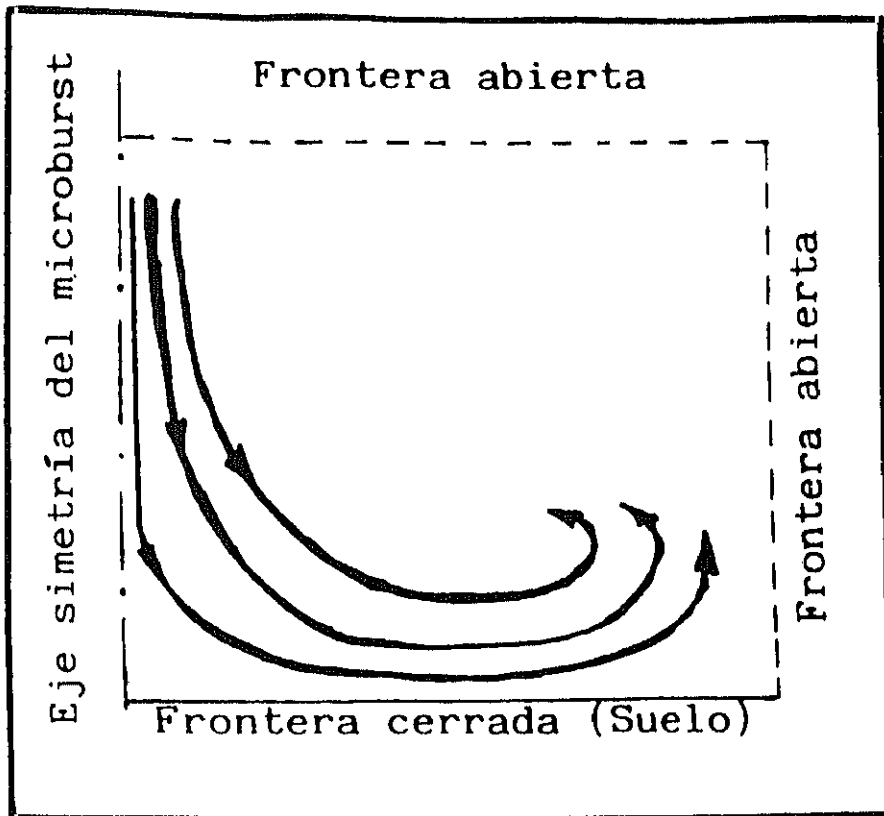


Fig. 3.2 : Representación esquemática del dominio fluido simulado con el desarrollo de la descendencia dentro del mismo.

b) Condiciones existentes en la frontera del dominio

Los tipos más comunes de contornos que se pueden determinar en el análisis de flujos son:

- pared sólida

- frontera abierta (entrada y/o salida de masa)
- superficies de separación (líquido-gas, líquido-líquido o gas-gas)
- contornos coincidentes con un eje de simetría, debido a aproximaciones o simplificaciones previas.

A continuación se analizan las condiciones que corresponden en cada caso.

i) Pared sólida

Puesto que en una pared sólida impermeable no hay deslizamiento ni paso de calor del fluido las condiciones que deben cumplirse son

$$V_{fluido} = V_{pared} \quad T_{fluido} = T_{pared}$$

la única excepción a estas condiciones se tiene en el flujo de gases muy rarificados en cuyo caso puede haber deslizamiento. Si hacemos la simplificación de no considerar la viscosidad, se debe eliminar la condición de no deslizamiento en la pared. Se permite que el fluido puede deslizarse paralelamente a la pared, pero no penetrar en la pared, ya que ésta es impermeable al flujo. La condición de impermeabilidad de la pared se representa teniendo en cuenta que las velocidades normales del fluido sean iguales a las de la pared.

$$(V_n)_{fluido} = (V_n)_{pared}$$

Puesto que en la mayor parte de las situaciones la pared es fija, la condición apropiada, es que la velocidad normal del fluido en contacto con la pared es nula.

ii) Frontera abierta

En las secciones de entrada o salida se conocen las distribuciones de velocidad y de las variables termodinámicas en todo instante.

Puede considerarse que las secciones de entrada y salida antes de la discretización estuvieran en el infinito, simulando que el fluido en el dominio estudiado se extiende hasta el infinito, pero puesto que el número de celdas no puede ser infinito y para dar una forma matemática concreta a las condiciones de contorno, se considera que en la frontera, que se supone está suficientemente alejada del fenómeno, las funciones fluidas toman los valores que corresponderían al infinito.

Si el número de celdas es pequeño, o la frontera está muy cercana al fenómeno que se estudia, los errores introducidos por estas simplificaciones pueden ser muy grandes.

Otra opción es extrapolar los valores de las funciones fluidas en los puntos que están fuera del dominio, a partir de los valores que se han calculado anteriormente para el estudio en la frontera. Consiste en dar valores a las *celdas fantasma* basados en los valores de las celdas adyacentes que están dentro del dominio con funciones del

tipo:

$$\phi_{cf} = b \phi_{cd} + c_{\phi} \quad (3.53)$$

donde:

$$b = 1 - \frac{\Delta t}{\tau} \quad c_{\phi} = \frac{\Delta t}{\tau} \phi_{\infty}$$

siendo ϕ una cualquiera de las variables termodinámicas ρ , T , ρ . Los subíndices cf y cd indican respectivamente una *celda fantasma* y la celda de dominio más cercana.

ϕ_{∞} es el valor que la variable fluida toma en el infinito y τ es una constante temporal que depende del tiempo que las variables fluidas necesitarían para tener los valores ϕ_{∞} que les corresponderían si no se produjera ninguna otra perturbación en el dominio. Respecto a la velocidad la relación es:

$$V_{cf} = V_{cd}$$

Ejes de simetría

La simetría se aplica a la distribución de velocidades y a los valores de las variables termodinámicas. No pueden existir líneas de corriente que atraviesen un eje de simetría, así que, con respecto a la velocidad tenemos una restricción semejante a la que crearía una pared fija a un fluido no viscoso, pero puede haber deslizamiento del fluido que esté junto al eje de simetría aunque el

fluido que consideremos sea viscoso.

$$(V_n)_{\text{fluido}} = 0$$

Hay que tener en cuenta una segunda condición que se debe a que la distribución de temperaturas es también simétrica con respecto a ese eje, y por tanto no puede haber conducción de calor a través del eje de simetría.

3.3.8.- SUPERFICIES DE SEPARACIÓN ENTRE FASES O SUSTANCIAS DISTINTAS

Las condiciones más complejas se tienen en la superficie de separación entre un líquido y un gas, o superficie libre. Para representarla hay que tener en cuenta que debe haber igualdad de velocidades en la superficie de separación de modo que no aparezcan huecos entre las sustancias. Es la *condición cinemática de contorno*. También debe existir equilibrio mecánico en la interfase. Los esfuerzos viscosos tangenciales deben equilibrarse si la tensión superficial es constante. Despreciando los esfuerzos viscosos normales, las presiones deben equilibrarse en la superficie excepto por los efectos de la tensión superficial. El flujo de calor normal a la superficie debe ser el mismo en ambos lados, puesto que no se puede almacenar en una superficie infinitamente delgada.

En la simulación realizada no aparecen este tipo de fronteras ya que consideramos al aire seco como único componente fluido del sistema. En el caso práctico se cumplirán las condiciones de contorno dando valores adecuados a las *celdas fantasmas* que están fuera del dominio pero que intervienen en los cálculos.

Una vez expuestos los tipos más comunes de contorno que se pueden encontrar en el análisis de flujos se hará la aplicación al dominio concreto en estudio y formando parte del método numérico utilizado en la simulación.

a) Lado izquierdo

Anteriormente se ha indicado que debe cumplirse que ni el fluido ni el

calor atraviesen el eje de simetría y como éste coincide con el borde del dominio fluido, las *celdas fantasma* están al otro lado del eje. Para conseguir que se cumplan ambas condiciones se asigna a las *celdas fantasma* valores de presión, temperatura, densidad y velocidad vertical iguales a las que tiene su *celda imagen* al otro lado del eje de simetría. Para que se mantenga la condición de simetría, la velocidad horizontal debe ser igual y contraria.

Las celdas se numerarán horizontalmente de izquierda a derecha indicándose la *celda fantasma* con subíndice $i = 0$ y siendo denotada la primera celda del dominio con subíndice $i = 1$. El eje de simetría está por tanto entre ellas. Los valores de las *celdas fantasmas* que están en el lado izquierdo del eje de simetría serán actualizados cada vez que varíen los valores correspondientes a sus celdas simétricas, de manera que siempre se cumplan las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned}
 \rho_{0,j}^n &= \rho_{1,j}^n \\
 u_{0,j}^n &= -u_{1,j}^n \\
 w_{0,j}^n &= w_{1,j}^n \\
 P_{0,j}^n &= P_{1,j}^n \\
 T_{0,j}^n &= T_{1,j}^n
 \end{aligned}
 \tag{3.54}$$

para cualesquiera valores de n y j donde el parámetro, n , indica cualquier instante y el subíndice, j , identifica las celdas en su posición vertical. Con ello se consigue que en el eje de simetría todos los

gradientes horizontales sean cero y por tanto no se transmite energía en forma calorífica a través del eje de simetría, y que la aceleración horizontal, dada por la ecuación

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} - u \frac{\partial u}{\partial x} - w \frac{\partial u}{\partial z} \quad (3.55)$$

sea siempre nula para las partículas fluidas que están en el eje de simetría.

b) Lado inferior

El terreno se comporta en la simulación realizada como una pared fija impermeable al flujo. Las celdas se numerarán de abajo-arriba, de manera que las celdas de subíndice ($j \geq 1$) son las que están situadas por encima del límite inferior y, por tanto, pertenecen al dominio fluido, y las celdas de subíndice ($j = 0$) son *celdas fantasmas* que están por debajo de dicho límite. El suelo constituye la frontera entre estas celdas.

Se ha de cumplir que, por la condición de impermeabilidad, el flujo no atraviesa la pared, pero al no considerar la viscosidad si puede existir deslizamiento. No es relevante cual es el valor de velocidad horizontal u que tengan las *celdas fantasmas* pero el valor de velocidad vertical w debe ser igual y contrario del que tengan las celdas que están situadas simétricamente con respecto a ellas. Puede considerarse que haya flujo de calor, ya que se supone que la temperatura del suelo es fija a lo largo de toda la simulación. El valor asignado a la densidad del fluido es indiferente, ya que a través de esta frontera no habrá flujo de aire.

Para conseguir que las partículas fluidas que estén en contacto con el suelo no tengan aceleración vertical y, por lo tanto no se muevan verticalmente, es muy importante el valor asignado para la presión en las *celdas fantasma*. Teniendo en cuenta la ecuación que indica la aceleración vertical de una partícula fluida:

$$\frac{\partial w}{\partial t} = -g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - u \frac{\partial w}{\partial x} - w \frac{\partial w}{\partial z} \quad (3.56)$$

se observa que, para que la aceleración vertical sea cero, el gradiente vertical de presión debe anularse con el término debido a la gravedad. Para hacer que esto se cumpla siempre, el valor de la presión en las *celdas fantasma* se actualizará sumando el valor de la presión presente en la celda colocada justo encima de ella con el valor de presión debido a la variación de altura, que viene expresada por la ecuación de la estática de los fluidos:

$$dp = -\rho g dh \quad (3.57)$$

Las relaciones que se usarán para ir actualizando en cada cálculo los valores en las *celdas fantasma* colocadas en el lado inferior son las siguientes:

$$\begin{aligned} \rho_{i,0}^n &= \rho_{i,1}^n \\ u_{i,0}^n &= u_{i,1}^n \\ w_{i,0}^n &= -w_{i,1}^n \\ p_{i,0}^n &= p_{i,1}^n + g\rho_{i,1}^n \Delta z \\ T_{i,0}^n &= T_{i,1}^n \end{aligned} \quad (3.58)$$

c) Lado derecho

En principio, este lado es una frontera abierta en la que puede haber flujo de masa y energía. Tratar en un algoritmo este tipo de fronteras cuando las condiciones en las mismas dependen más del fenómeno que estamos estudiando que de las condiciones en el infinito presenta grandes dificultades. Por ello la solución más adecuada es alejar las fronteras haciendo el dominio más grande. Si las fronteras estuvieran muy alejadas del fenómeno simulado, podría suponerse que éste no afecta a las condiciones de la frontera en el infinito. Al considerar en el infinito la velocidad nula, incluso podríamos simplificar las condiciones de contorno al no haber flujos a través de la frontera.

Por otro lado, simular un flujo descendente que suceda dentro de un recinto cerrado físicamente por todos sus lados, o bien considerar un dominio no muy grande comparado con el fenómeno, alteraría gravemente las condiciones en las que éste se produce, con lo que los resultados obtenidos no podrían ser comparados con los del fenómeno real.

Por ello se propone una solución más compleja que consiste en que para simular una frontera abierta utilizaremos el método de extrapolación de valores analizado anteriormente. Consiste en dar a las funciones fluidas en las *celdas fantasma* los mismos valores que tienen las celdas inmediatas del dominio. Con este método, eliminamos el efecto de relajación de las funciones fluidas debido a la influencia del entorno. Los errores que se produzcan se considerarán aceptables si no afectan a la

estabilidad del modelo.

El flujo horizontal que aparecerá en la simulación será algo más intenso que el que se produciría en la realidad cuando se aproxima a la frontera derecha, por ello, y para el caso de la velocidad horizontal, se incluirá un factor de amortiguación constante.

El conjunto de relaciones que se utiliza para la frontera lateral derecha es:

$$\begin{aligned} \rho_{n_{ulon}+1,j}^n &= \rho_{n_{ulon},j}^n \\ u_{n_{ulon}+1,j}^n &= 0,2 u_{n_{ulon},j}^n \\ w_{n_{ulon}+1,j}^n &= w_{n_{ulon},j}^n \\ p_{n_{ulon}+1,j}^n &= p_{n_{ulon},j}^n \\ T_{n_{ulon}+1,j}^n &= T_{n_{ulon},j}^n \end{aligned} \quad (3.59)$$

donde el subíndice *nulon* indica la última celda del dominio en sentido longitudinal y *nulon + 1* indica su *celda fantasma* adyacente.

d) Lado superior

Es una frontera abierta, y de forma semejante a como se analizó el lado derecho pueden hacerse las mismas consideraciones que con respecto a esa frontera. Pero las relaciones utilizadas para dar valores a las *celdas fantasma* de esta frontera no pueden ser iguales que las usadas en la frontera derecha, ya que al igual que sucedía en la frontera inferior hay que tener en cuenta la variación de presión con la altura.

Si no se contempla esta condición, el fluido situado junto a la frontera superior sufriría una enorme aceleración hacia arriba, semejante a la que produciría una explosión. Para el resto de las variables se pueden utilizar las mismas relaciones expresadas para la frontera derecha:

$$\begin{aligned}
 \rho_{i, nualt+1}^n &= \rho_{i, nualt}^n \\
 u_{i, nualt+1}^n &= u_{i, nualt}^n \\
 w_{i, nualt+1}^n &= w_{i, nualt}^n \\
 p_{i, nualt+1}^n &= p_{i, nualt}^n - g\rho_{i, nualt}^n \Delta z \\
 T_{i, nualt+1}^n &= T_{i, nualt}^n
 \end{aligned}
 \tag{3.60}$$

donde el subíndice *nualt* indica la última celda del dominio en altura por el lado superior, y el subíndice *nualt + 1* indica la *celda fantasma* colocada inmediatamente encima.

3.3.9.- ALGORITMO UTILIZADO EN LA INTEGRACIÓN CON RESPECTO A LA VARIABLE TIEMPO

Como ya se ha indicado anteriormente, para la simulación numérica se ha utilizado un método Runge - Kutta mejorado cuya convergencia está garantizada en las condiciones adecuadas. En el diagrama de flujo de la *Figura 3.3* se indica el proceso de desarrollo del algoritmo para calcular los valores $\rho_{n+1}, u_{n+1}, w_{n+1}, T_{n+1}, p_{n+1}$ en una celda del dominio en estudio a partir de los valores $\rho_n, u_n, w_n, T_n, p_n$ correspondientes al paso anterior en esa celda y en las colindantes. La colocación descendente establece el orden en que esos cálculos serán efectuados, indicándose asimismo mediante las flechas correspondientes cuales son los datos, de entre los ya obtenidos, que intervienen en cada operación.

Este algoritmo debe aplicarse a cada una de las funciones fluidas (ρ, u, w, T, p) y en cada una de las celdas, siguiendo el orden marcado en el proceso de cálculo. Dado que para evaluar las derivadas parciales es necesario conocer los valores estimados de las funciones en las celdas contiguas en ese mismo instante, tiene que aplicarse el algoritmo simultáneamente a todas las celdas y a todas las funciones fluidas, es decir, se ha de efectuar el cálculo de cada coeficiente K_r para las cinco funciones fluidas en todas las celdas, antes de continuar con el cálculo del siguiente coeficiente K_r .

Cada uno de los resultados que se van obteniendo debe ser almacenado temporalmente ya que será utilizado convenientemente a lo largo del desarrollo del algoritmo. Entre paso y paso sólo se necesita almacenar los valores

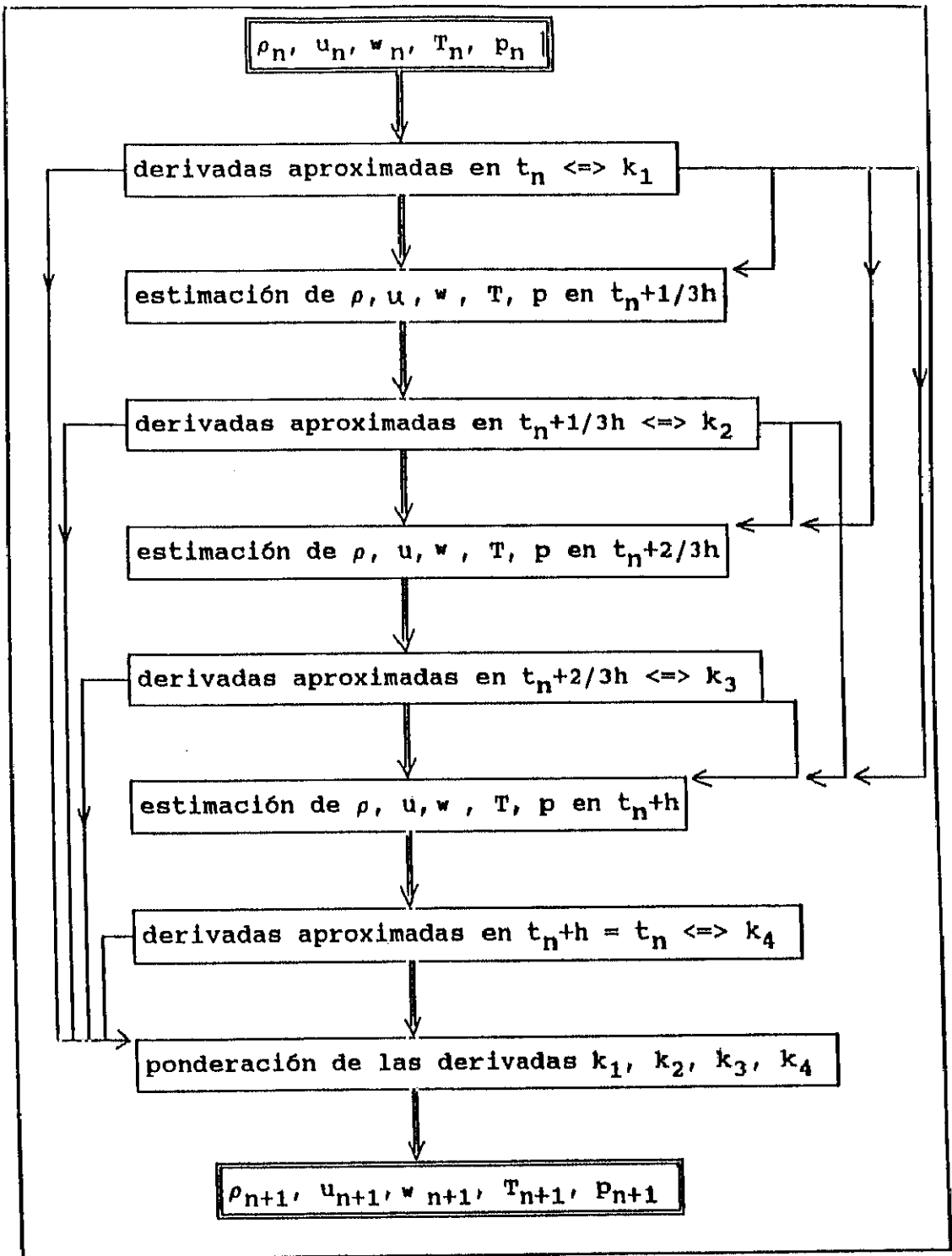


Fig. 3.3 : Diagrama de flujo indicativo del proceso de desarrollo del algoritmo.

definitivos de las funciones fluidas correspondientes a los instantes n y $n + 1$, pero en el transcurso de cada cálculo se deben almacenar los valores para cada una de las cinco variables fluidas y para cada una de las celdas.

Debe abordarse ahora el problema de la aplicación del algoritmo a las celdas que están en los límites del dominio fluido. Como ya se indicó anteriormente, el cálculo de las derivadas parciales espaciales requiere conocer los valores de las funciones en las celdas adyacentes, pero las celdas que están en el borde del dominio carecen de celdas contiguas por alguno de sus lados. Se podría solucionar este aspecto modificando el algoritmo para esas celdas, de manera que las derivadas parciales se calculen a partir de las celdas que están en el interior del dominio y de manera tal que se respeten siempre las condiciones de contorno.

Este problema se resolverá colocando alrededor del dominio fluido una capa de celdas ficticias, que llamaremos *celdas fantasma* como se esquematiza en la *Figura 3.4*, que no pertenecen al dominio fluido en estudio pero que permiten que se puede aplicar el mismo algoritmo a todas las celdas que sí le pertenecen. Los valores de las variables fluidas calculadas para esas *celdas fantasma* se guardan en las mismas matrices en que están almacenados los valores correspondientes a las celdas reales. Los valores que deben darse en cada instante en las *celdas fantasma* depende fundamentalmente de las condiciones de contorno ya indicadas.

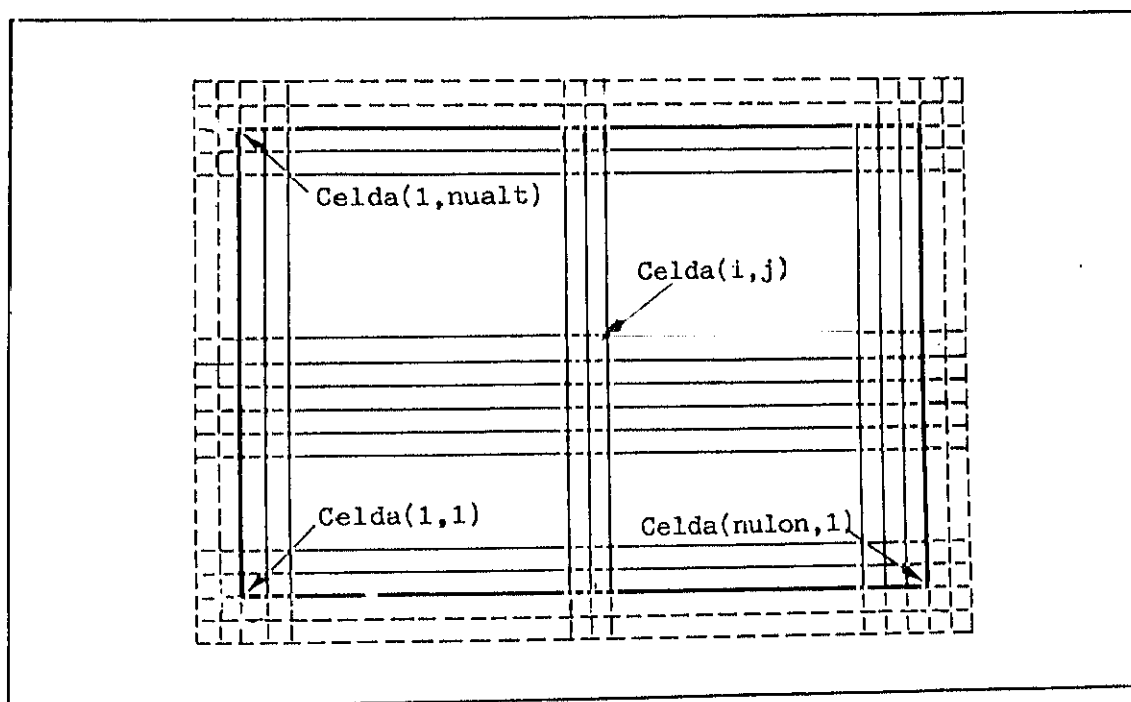


Fig. 3.4 : Representación del dominio computacional bidimensional.

3.4.- RECREACIÓN DEL MICROBURST

Las causas de las descendencias atmosféricas del fenómeno Microburst, son debidas a los procesos de fusión y sublimación de las precipitaciones sólidas (granizo, nieve, etc...) y evaporación de la precipitación líquida en su caída (gotas de agua). Estos procesos suceden cuando la precipitación en su descenso penetra en capas de la atmósfera que presentan menor humedad relativa, ya sea por estar a mayor temperatura o por haber menor humedad absoluta. Los procesos de fusión sublimación y evaporación son todos endotérmicos. La absorción de entalpía por parte del agua provoca una disminución de la temperatura del aire que se comprime y aumenta su densidad. Al aumentar el peso específico del aire en esa zona, se produce un desequilibrio de presiones que crea una aceleración descendente que inicia el fenómeno del Microburst.

Como no es posible tener en cuenta todos los aspectos del fenómeno en la simulación, se describen a continuación las simplificaciones consideradas para poder producir un modelo matemático que sirva para representar el proceso:

En el estudio no se van a tener en cuenta los procesos de cambios de estado de la precipitación ni considerar la presencia de agua. El componente del sistema en este estudio será el aire seco, y el efecto de la precipitación se tendrá en cuenta mediante el enfriamiento que provoca del aire. Con los datos obtenidos de las observaciones realizadas a Microburst reales, se estimará la intensidad del enfriamiento que se produce en el núcleo de un Microburst de dimensiones medias (Srivastava, 1985).

En cuanto a la forma del núcleo del Microburst, se considera que se aproxima a la de un cilindro de altura y radio determinados, situado a una altura sobre el suelo que también se estimará a partir de las observaciones experimentales (Hjelmfelt, 1988). El eje de simetría axial del Microburst debe coincidir con el eje del cilindro. Con el fin de realizar el estudio sobre el modelo con una aproximación lo más cercana posible a la realidad, se considera que el enfriamiento no es igual en todo el cilindro, sino que varía parabólicamente, siendo nulo en los extremos superior e inferior del cilindro y máximo en la mitad de su altura (Proctor, 1989).

Ya que la representación del Microburst va a ser bidimensional, el núcleo del mismo será un rectángulo cuyo eje de simetría vertical coincide con el eje de la descendencia, y puesto que aprovechando además su simetría solo se va a simular un lado del Microburst, igualmente, solo se considerará la mitad de este rectángulo que estará situado en contacto con el lado izquierdo del dominio. La altura del rectángulo coincide pues con la altura del núcleo, y su anchura con el radio. Estos datos se deberán dar antes de iniciar la integración numérica, junto con la posición en altura del núcleo y la intensidad máxima del enfriamiento con relación al tiempo.

Iniciado el proceso de simulación, al finalizar cada paso se provocará un enfriamiento en las celdas que están dentro del rectángulo que representa el núcleo. El valor del enfriamiento en cada celda, vendrá dado por el producto del valor del enfriamiento máximo por un factor que variará parabólicamente entre cero y uno, valiendo cero en los extremos superior e inferior del núcleo de enfriamiento y uno en su centro. Con este

procedimiento se consiguen dos objetivos, acercar más el comportamiento al de la descendencia real, ya que en la realidad, la intensidad de los procesos de fusión y evaporación no es igual a todas las alturas del núcleo de formación del Microburst, y evitar en lo posible que en el modelo aparezcan discontinuidades en los campos de presión y densidad. Las discontinuidades en los valores de las funciones fluidas, provocan la aparición de ondas que pueden inestabilizar el modelo o falsear sus resultados. La aparición de ondas no reales debida a la discretización, es un problema que puede eliminarse mediante un filtrado que se realizaría disminuyendo el paso de integración.

CAPÍTULO 4

SIMULACIÓN NUMÉRICA DEL MICROBURST

4.1.- GENERALIDADES SOBRE EL CÓDIGO UTILIZADO

El algoritmo analizado anteriormente se ha codificado en un programa ejecutable en lenguaje C++ de nombre MB. El programa permite descomponer el dominio en estudio donde se desarrolla la simulación del fenómeno del Microburst en 400 elementos o celdas, formando un mallado euleriano regular rectangular de 20x20 celdas, lo que significa que aplicado a un volumen atmosférico de 2000 metros de anchura por 2000 metros de altura (tégase en cuenta la simetría vertical de la descendencia, por lo que sólo es necesario contener en ese volumen la mitad del Microburst), permite calcular los valores de las funciones termodinámicas en puntos separados 100 metros entre sí, lo que se considera una precisión muy aceptable.

Mediante el programa referenciado se calculan los valores de presión, densidad, temperatura y velocidad en cada una de las celdas, para cada uno de los pasos del proceso, almacenando los datos en los siguientes archivos:

- archivo mbtem para la temperatura
- archivo mbden para la densidad
- archivo mbpre para la presión
- archivo mbvel para la velocidad
- archivo mbdat en que se mantienen los datos sobre las condiciones del experimento, dominio representado, mallado, características de la atmósfera inicial y del Microburst, etc...

Se prevé la opción de poder guardar en los archivos los datos de todos los

pasos realizados, o sólo una parte de ellos por economía de cálculo. Para poder seguir la evolución de la simulación del experimento mientras se está ejecutando, el programa va presentando por pantalla los datos correspondientes a una masa de aire significativa del fenómeno estudiado. La propuesta consiste en tener información sobre los valores de las variables antes indicadas en una columna de aire situada dentro del Microburst, pero que no corresponda a su eje de simetría porque allí las velocidades horizontales son siempre nulas, tal como ya se indicó pormenorizadamente al analizar las condiciones de contorno, y por tanto no puede estimarse si a una determinada altura se está produciendo convergencia o divergencia. La situación que se considera más idónea corresponde a una columna de aire situada a 550 metros del eje del Microburst, que en la mayoría de los experimentos realizados está posicionada cerca del borde del flujo descendente.

Una vez finalizada la simulación numérica del fenómeno, se procede al análisis detallado de los resultados obtenidos mediante la visualización gráfica de los mismos. Así se obtiene el campo de velocidades del aire en cada instante de la simulación, colocando en el centro de cada celda los vectores de dirección y módulo correspondientes al valor de la velocidad en ese punto. Asimismo también se indica cual es el valor de la velocidad máxima en el dominio en cada instante y donde se encuentra situada.

4.2.- PARÁMETROS DEL MODELO

Para la realización del proceso de simulación del fenómeno Microburst se **distinguirán** los siguientes parámetros que deben suministrarse durante el **desarrollo** del programa:

a) Tamaño del dominio a simular.

Corresponde a la altura máxima z y distancia horizontal x desde el eje de la descendencia hasta el borde del dominio, considerando que, debido a la simetría vertical sólo es necesario contener en dicho recinto la mitad del fenómeno en estudio.

$$x = 2.000 \text{ m} \qquad z = 2.000 \text{ m}$$

b) Duración temporal del fenómeno e intervalo del paso de Integración.

Para el estudio del fenómeno se introduce el tiempo en segundos durante el cual se quiere proceder a la simulación. Al completar el proceso de integración numérica hasta el instante predeterminado, se prevé una opción que permite continuar el experimento durante quince segundos más.

Por lo expuesto al analizar la morfología del Microburst, se ha verificado que existe un proceso cuasi-simétrico en relación con el tiempo de duración del fenómeno, desde que inicia su desarrollo hasta el momento de máxima intensidad, y que es del mismo orden que el tiempo comprendido desde el instante de máxima intensidad hasta su total decaimiento (Hjelmfelt 1988). Mediante la simulación se pretende analizar el desarrollo del Microburst desde el inicio de la descendencia hasta que

se alcanza el punto de intensidad máxima, puesto que se considera que es el más relevante y adecuado en cuanto a su influencia y efecto sobre las aeronaves que se encuentran bajo la acción de dicho fenómeno. Por tanto, a partir del instante en el que se alcanza la máxima intensidad del Microburst, se elimina el forzamiento correspondiente al enfriamiento en el núcleo descendente, y el proceso que sigue a continuación se considera simétrico en cuanto al tiempo de duración del proceso. En consecuencia se analiza la evolución de la descendencia durante un periodo de tiempo correspondiente a 500 segundos.

Respecto al paso de integración se considera aceptable, por lo expuesto anteriormente, considerar un valor de 0,5 segundos para garantizar la convergencia del método.

c) Intervalos de los pasos de integración.

Ya se ha expuesto la utilización de un mallado euleriano regular rectangular, por lo que ahora procede a indicar la separación horizontal y vertical de los elementos del mallado, es decir, el tamaño de los lados de las celdas correspondientes y cuyos valores son:

$$\Delta x = 100 \text{ m} \qquad \Delta z = 100 \text{ m}$$

d) Estado inicial de la atmósfera.

Primeramente se introduce el valor del coeficiente politrópico de la atmósfera en la que se va a desarrollar el fenómeno del Microburst, y a partir del cual se calcula el gradiente vertical de temperatura en el instante inicial. Asimismo se aportan los valores iniciales a nivel del suelo de

temperatura en grados kelvin y presión en pascales. Con estos datos queda determinado el estado inicial de la atmósfera considerándose que inicialmente la velocidad es nula en todos los puntos del dominio.

e) Parámetros relativos al proceso de la descendencia.

A consecuencia del proceso producido por la precipitación que inicia el fenómeno de la descendencia, se introduce el parámetro de la intensidad del enfriamiento, que representa la máxima variación de la temperatura del aire en el núcleo del Microburst expresada en $K s^{-1}$

f) Dimensiones del núcleo.

Otros parámetros del fenómeno Microburst son la dimensión de la zona de enfriamiento, que se considera de forma cilíndrica como ya se ha indicado anteriormente, y cuyas características se proporcionan indicando el radio del cilindro del núcleo de enfriamiento del Microburst (representado por R en metros) y las alturas correspondientes a la situación de sus bases superior e inferior:

HS: altura máxima a la que se produce enfriamiento (m)

HI: altura mínima a la que se produce enfriamiento (m) que indica la altura donde la precipitación se ha evaporado completamente; así pues los experimentos de la simulación donde $HI = 0$ corresponden al estudio de Microburst húmedo en el que la precipitación llega hasta el suelo, en tanto que para $HI > 0$ la simulación corresponde a Microburst seco, no recogándose precipitación en la superficie del terreno.

4.3.- ANÁLISIS SOBRE LA ESTABILIDAD Y CONVERGENCIA DEL MÉTODO NUMÉRICO

Para comprobar y asegurar el correcto funcionamiento del algoritmo numérico y del código utilizado, se han realizado dos experiencias de simulación:

a) Atmósfera estacionaria sin perturbaciones.

Se proporcionan los datos correspondientes a un dominio atmosférico de 2000x2000 m en equilibrio indiferente y velocidades nulas, dándose al enfriamiento en el núcleo del Microburst valor cero y se observa la evolución del fenómeno. Una vez desarrollado el proceso a lo largo del tiempo las máximas velocidades obtenidas son del orden de cm s^{-1} . La máxima velocidad horizontal en el dominio es $-0,02 \text{ m s}^{-1}$ y la máxima velocidad vertical $0,15 \text{ m s}^{-1}$. Estos valores se deben a la acumulación en cada paso de los errores de truncamiento propios del algoritmo, con lo que los resultados de este experimento indican que los errores son despreciables, ya que las velocidades que normalmente aparecen por causa del Microburst son del orden de decenas de metros por segundo.

b) Adaptación a una atmósfera perturbada.

Se procede a una modificación parcial para que las fronteras derecha e izquierda sean abiertas, y en ellas se proporciona a la velocidad un valor constante e igual a 10 m s^{-1} , de manera que se fuerza a que por la frontera izquierda entre fluido a esa velocidad y por la derecha salga fluido. Inicialmente las velocidades en el interior del dominio son nulas. Transcurridos veinticinco segundos del experimento todas las velocidades

en el interior del dominio alcanzan el valor inicial de prueba de 10 m s^{-1} y la situación permanece estacionaria.

Del análisis de ambos experimentos se concluye que el funcionamiento del código es satisfactorio y que los valores que se obtienen en los distintos supuestos son correctos.

4.4.- ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

Para determinar el rango aproximado de validez de los parámetros más significativos del modelo utilizado se han realizado diversos ensayos de sensibilidad. Para ello se han fijado límites de variabilidad de dichos parámetros teniendo en cuenta los valores extremos obtenidos mediante valoraciones experimentales. Una vez establecidos dichos límites, se irá actuando sobre cada una de las variables modificando los valores de forma secuencial, en tanto que los demás parámetros permanecen constantes.

Se adoptarán dos criterios para cada individualización del proceso, uno que corresponde a la condición inhibidora del fenómeno ensayado, con lo que se analizan las condiciones del rango inferior de actuación sobre el fenómeno del Microburst, y el segundo criterio correspondiente a la condición potenciadora del proceso estudiado, lo que permite estudiar las condiciones del experimento en su rango superior de actuación. Hay que dejar claramente definido que cuando se indica condición inhibidora no se refiere a ninguna actuación que impida el desarrollo del Microburst, sino únicamente como la determinación de unos valores límites que *a priori* aparecen como los más adecuados para la producción de un desarrollo menos intenso del fenómeno. Análogamente la condición potenciadora no implica una actuación que acelere el desarrollo de la descendencia, sino la determinación de valores límites que *a priori* produzcan desarrollos más intensos del Microburst. La elección de estos valores límites están basados tanto en las observaciones realizadas sobre diferentes casos de fenómenos descendentes (Hjelmfelt, 1988) como en el diseño conceptual del modelo empleado.

A continuación se expone detalladamente la variación sobre cada uno de los parámetros en estudio.

a) Enfriamiento en el núcleo descendente

Se ha considerado que el fenómeno de la descendencia se produce a consecuencia de la precipitación que se origina por debajo de la zona nubosa. Para ello se introduce en el modelo el parámetro de intensidad del enfriamiento en el núcleo de la descendencia que simula el comportamiento del Microburst.

Dicho parámetro se ha analizado en el rango de variación de los siguientes valores:

$$- 0.005 \leq \frac{dT}{dt} \leq - 0.025 \quad (K s^{-1})$$

y en la *Figura 4.1* se presentan los valores de la velocidad máxima en función del tiempo en las dos condiciones estudiadas: condición inhibidora y condición potenciadora del fenómeno Microburst.

Se observa que para valores altos de la intensidad de enfriamiento el proceso es ampliamente divergente en tiempos relativamente cortos, produciendo Microburst de muy corta duración que no responden a los fenómenos reales medidos experimentalmente. Por otro lado, valores bajos de la intensidad de enfriamiento no producen desarrollos apreciables en la generación del Microburst. Considerando las condiciones potenciadoras del fenómeno se observa que los mayores valores de las

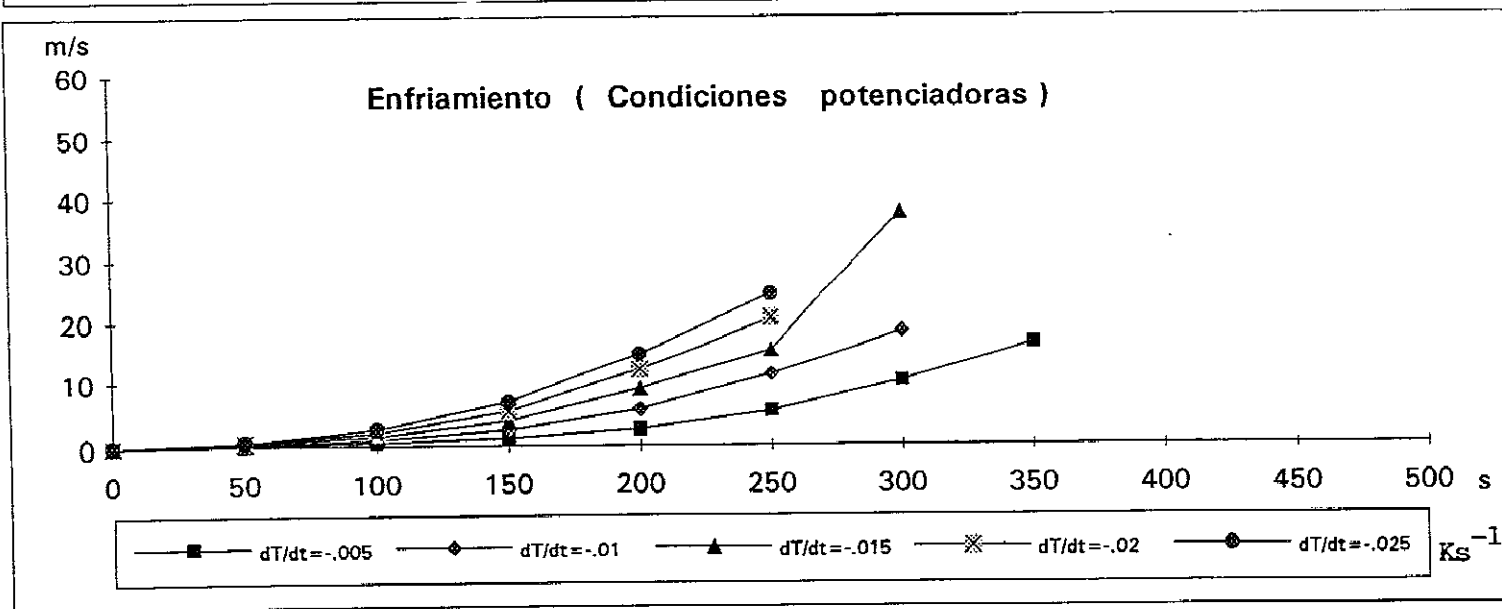
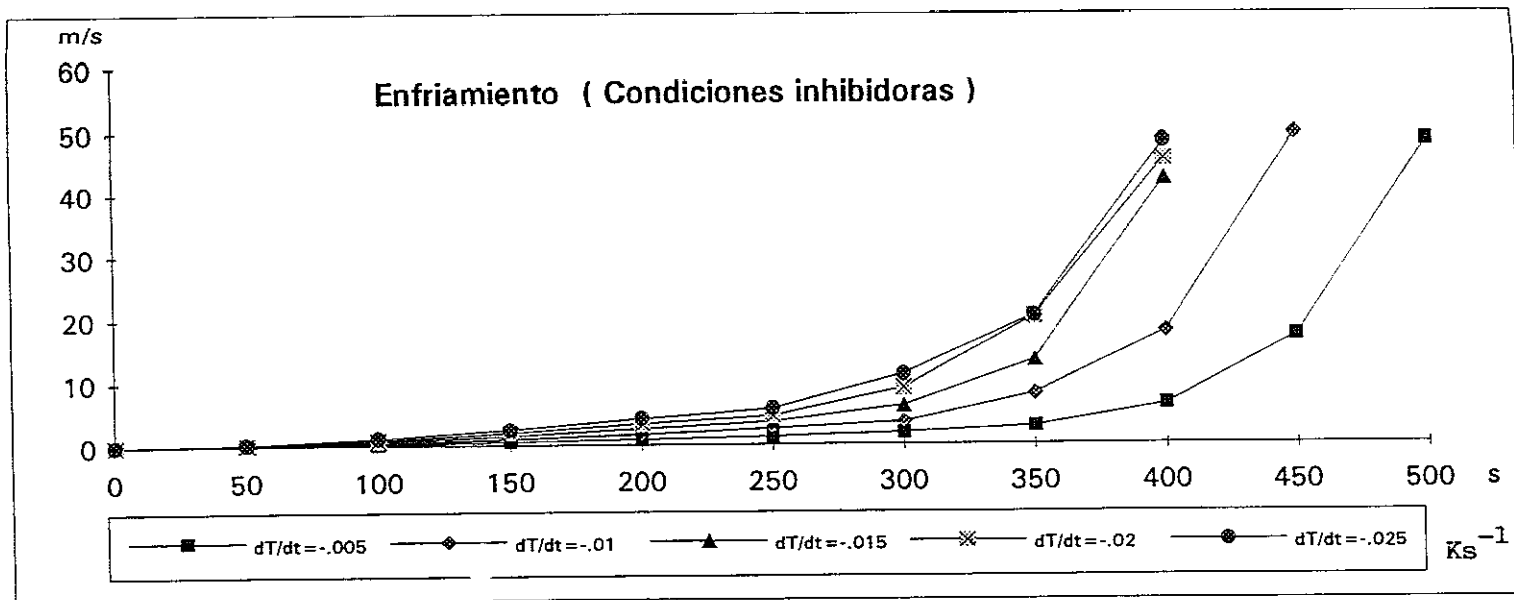


Fig. 4.1 : Velocidad máxima en función del tiempo para el parámetro intensidad de enfriamiento.

velocidades máximas corresponden a parámetros de enfriamiento más intensos, incrementándose sustancialmente dichos valores en todo el rango del enfriamiento ensayado para los instantes comprendidos entre 200 y 300 s , en tanto que superado este tiempo se obtienen valores de velocidad muy por encima de lo apropiado.

El análisis de las condiciones inhibitoras indican que para tiempos del orden de 400 s y con enfriamientos intensos, las velocidades máximas exceden de los valores razonablemente esperados, lo que indica que el tiempo del orden de siete minutos es un límite adecuado para alcanzar la máxima intensidad del fenómeno, concordando con los valores observados experimentalmente (Hjelmfelt, 1988). El estudio realizado, confirma que el parámetro de la intensidad de enfriamiento en el núcleo descendente es muy definitorio del fenómeno Microburst en su desarrollo y evolución, puesto que controla la energía que se comunica al sistema responsable de la intensificación de la corriente descendente, como asimismo de la evolución en el tiempo de los valores máximos de la velocidad, ya que aunque estos valores sean diferentes, las evoluciones para un determinado enfriamiento son similares en las condiciones tanto inhibitoras como potenciadoras. En ambos casos el intervalo comprendido entre 250 a 350 segundos es donde empiezan a divergir sustancialmente los valores de velocidad máxima.

En el gráfico correspondiente a la condición inhibitora, se observa que a partir de 350 s desde el inicio del fenómeno se produce una variación sustancial del gradiente de velocidad, ya que mientras que en la posición

correspondiente a 300 s la diferencia de velocidad que se tiene entre los límites máximos y mínimos de la intensidad de enfriamiento es de 9 m s^{-1} , cuando se alcanza el instante 350 s dicha diferencia alcanza los 17 m s^{-1} . Del análisis de la gráfica correspondiente a la condición potenciadora se observa que el comportamiento anteriormente descrito se intensifica, ya que en instantes más cercanos al inicio del Microburst tal como 250 s se alcanzan diferencias de velocidad de 19 m s^{-1} entre los límites máximos y mínimos del parámetro intensidad de enfriamiento. Asimismo se observa que para esta condición potenciadora se producen desarrollos del Microburst muy limitados en el tiempo, excepto para el valor mínimo de la intensidad de enfriamiento, puesto que la evolución de las velocidades máximas presentan unos gradientes que aumentan muy rápidamente con el tiempo.

En consecuencia, del examen de los resultados obtenidos en la simulación se considera como valor más adecuado para la intensidad de enfriamiento

$$\frac{dT}{dt} = - 0.01 \quad (\text{K s}^{-1})$$

que produce fenómenos descendentes análogos a los casos reales analizados. Hay que hacer notar que con esta asignación del parámetro intensidad de enfriamiento, los valores de las velocidades máximas obtenidas en ambas condiciones se ajustan a los datos experimentales, lo que permite asegurar la buena elección del parámetro referenciado.

Es de especial importancia relacionar el valor del enfriamiento en el núcleo

descendente con la precipitación de lluvia equivalente que corresponde a dicho enfriamiento. En el modelo físico utilizado, tanto la precipitación como el intercambio de calor entre ésta y el aire circundante, han sido parametrizados por el enfriamiento. Dicha parametrización conlleva el supuesto de que en el interior del núcleo de la descendencia se produce la evaporación del agua por intercambio de calor con el aire que lo rodea. En una primera aproximación se puede asociar el valor del enfriamiento con la intensidad teórica de precipitación. Para ello se hace el supuesto que, en cada cilindro del núcleo de la descendencia de altura correspondiente al tamaño mínimo del mallado, la precipitación se evapora totalmente absorbiendo calor del aire que teóricamente ocupa dicho volumen cilíndrico. La cantidad de calor cedida por el aire es igual a la masa de agua por su calor de vaporización, con lo que a partir de esta igualdad se tiene que la cantidad de precipitación recogida viene dada por:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{c_{\text{aire}} \rho_{\text{aire}} V \frac{dT}{dt}}{L \rho_{\text{agua}}}$$

donde:

$\frac{dV}{dt}$ representa la cantidad de precipitación; L , el calor latente de vaporización del agua y $\frac{dT}{dt}$ la intensidad de enfriamiento.

Utilizando el valor de la intensidad de enfriamiento que se considera óptimo para el desarrollo del Microburst, se obtiene una intensidad de

precipitación de 1.6 mm h^{-1} que responde a valores típicos para este tipo de fenómenos.

b) Índice politrópico de la atmósfera

Teniendo en cuenta que el índice correspondiente a la estabilidad atmosférica corresponde al valor

$$\gamma = \frac{C_P}{C_V} = 1.41$$

se han realizado diversos experimentos tanto con atmósferas estables como con atmósferas inestables. En consecuencia los límites de variación de este parámetro se han tomado:

$$1.2 \leq n \leq 1.6$$

En la *Figura 4.2* se representa la variación de la velocidad máxima a lo largo del tiempo de desarrollo del Microburst para los valores considerados del índice de politropía, tanto para las condiciones inhibitoras como para las condiciones potenciadoras, observándose que cuanto más inestable es la atmósfera en la que se desarrolla el fenómeno descendente, más pronto se presentan los valores máximos de velocidad. Analizando la condición inhibitora se tiene que los valores de velocidad varían desde 1 m s^{-1} a los 250 s del desarrollo, hasta 8 m s^{-1} a los 400 s en el rango de variación del índice de politropía, y a partir de dicho instante la estructura del Microburst comienza su descomposición. Un comportamiento semejante se produce en la condición potenciadora, pero muy amplificado en el tiempo ya que se alcanzan diferencias máximas de velocidad de 16 m s^{-1} para el instante 250 s, en tanto que a partir de 300 s los valores que se

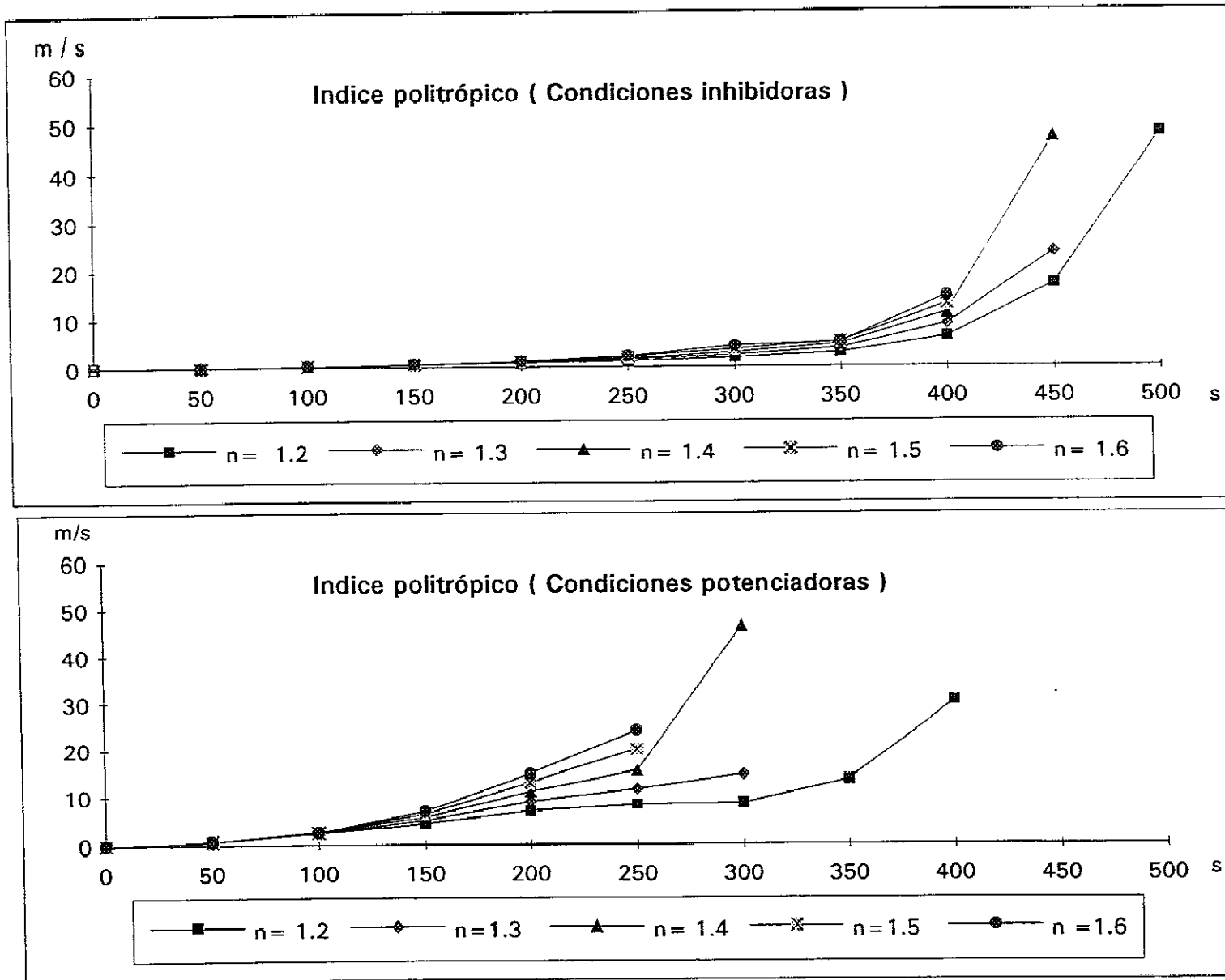


Fig. 4.2 : Velocidad máxima en función del tiempo para el parámetro índice politrópico de la atmósfera.

tienen sobrepasan ampliamente los rangos de velocidades típicas del Microburst, excepto para los valores más bajos del índice politrópico. En consecuencia, el índice politrópico que define el estado atmosférico indica la disposición acerca de si la atmósfera considerada, actúa como elemento inhibidor o potenciador de los movimientos verticales que dan lugar inicialmente a la formación de grandes cúmulos. Sin embargo este parámetro tiene un papel menos relevante que la intensidad de enfriamiento en la generación del Microburst.

En consecuencia las características más ajustadas a la experimentación se corresponden con atmósferas ligera o moderadamente inestables. Por tanto un índice politrópico de valor:

$$n = 1.5$$

responde adecuadamente a los resultados que de forma experimental se han medido durante la formación y desarrollo del Microburst.

c) Dimensiones del núcleo de enfriamiento

Teniendo en cuenta que la zona de enfriamiento donde se produce la descendencia, originada realmente por una precipitación, puede considerarse que corresponde a un núcleo de forma cilíndrica, deben analizarse las magnitudes geométricas más representativas del mismo. Por tanto se determinará el radio del cilindro y las alturas correspondientes a sus bases superior e inferior.

Considerando tanto el tamaño del dominio simulado como las dimensiones del mallado se han realizado experiencias dentro de los siguientes límites.

c.1) Altura de la base superior del cilindro

Se han realizado estudios de sensibilidad con distintos valores para la máxima altura en la que se inicia el enfriamiento, que corresponde a la zona donde comienza la precipitación. El rango de variación de este parámetro se ha establecido en:

$$700 \leq HS \leq 1.900 \quad (m)$$

para poder analizar tanto las condiciones inhibitoras como potenciadoras.

En la *Figura 4.3* se representan las velocidades máximas a lo largo del tiempo de desarrollo del Microburst. Considerando la altura superior del núcleo de la descendencia en sus rangos más bajos para la condición inhibitora, se aprecia una intensificación de los valores de velocidad máxima del fenómeno a partir de tiempos de desarrollo elevados, en tanto que para los períodos usuales de desarrollo del Microburst no se observan variaciones apreciables de la velocidad. Por el contrario, la condición potenciadora estimula la producción de la descendencia en tiempos relativamente cortos en los que se alcanzan velocidades que sobrepasan ampliamente los valores típicos correspondientes al Microburst. Del análisis del gráfico correspondiente a la condición inhibitora se desprende que en el comportamiento de las velocidades máximas, predomina la función de distribución del enfriamiento sobre la característica de la altura del núcleo, mientras que en el caso correspondiente a la condición potenciadora, es predominante la altura del cilindro de la

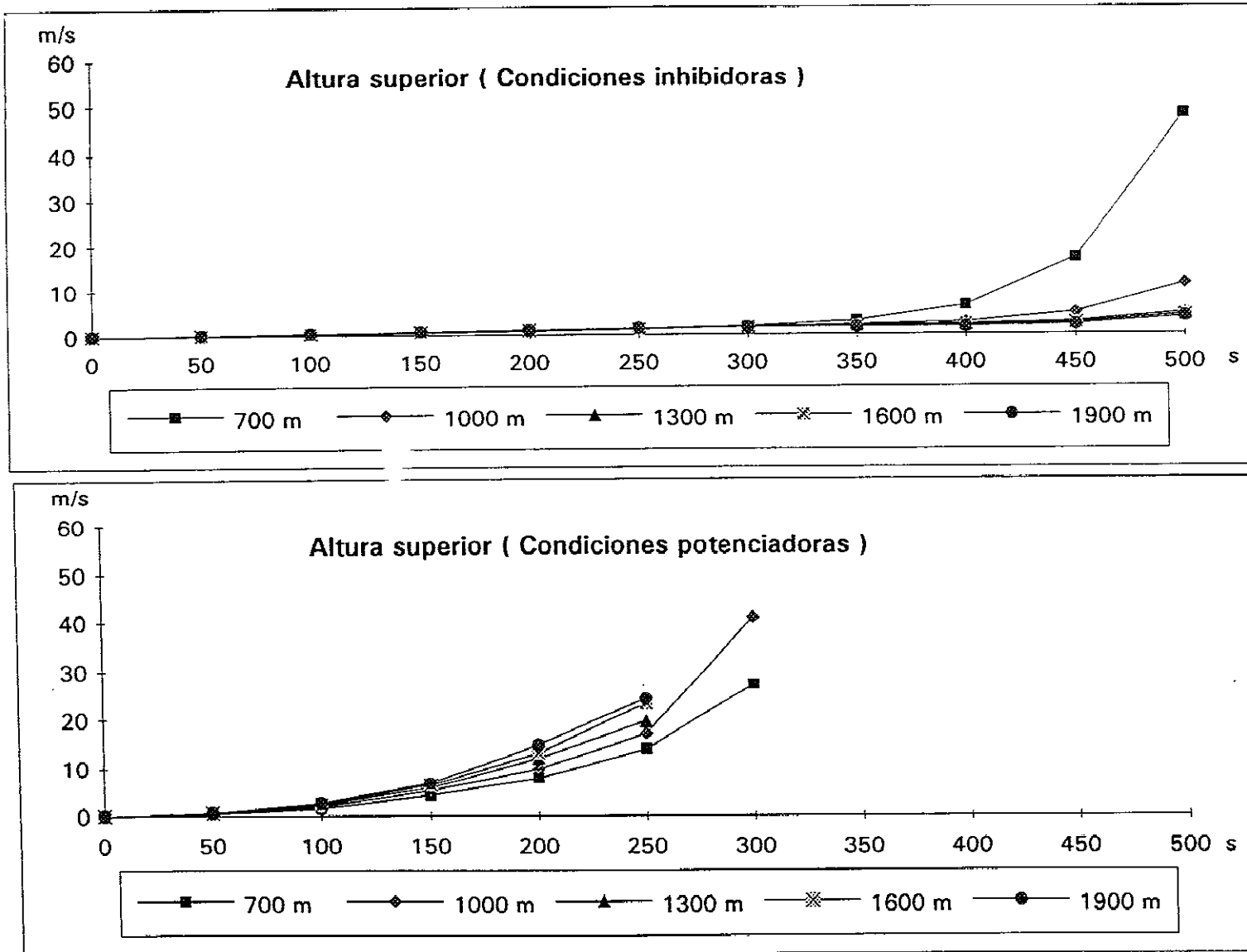


Fig. 4.3 : Velocidad máxima en función del tiempo para el parámetro altura de la base superior del cilindro de enfriamiento.

descendencia sobre la forma de la distribución del enfriamiento en relación con los valores de velocidad máxima.

En concreto, a partir del instante 350 s del inicio del Microburst, se observa que para núcleos de enfriamiento con menor altura se tienen valores más altos de velocidad máxima, con diferencias de 4.5 m s^{-1} en el instante 400 s para la condición inhibidora, en tanto que para la condición potenciadora se alcanzan diferencias en la velocidad máxima de 10 m s^{-1} para instantes de tiempo de 250 s, lo que confirma que para mayores alturas del núcleo de la descendencia las masas de aire sometidas al enfriamiento producen una intensificación de la corriente del Microburst. A partir de los valores obtenidos se fija la altura superior del núcleo de la descendencia en un valor de:

$$HS = 1.600 \text{ m}$$

que permite una evolución adecuada del fenómeno en estudio.

c.2) Altura de la base inferior del cilindro

Para dejar perfectamente delimitado en vertical el núcleo de enfriamiento que provoca la descendencia, se han considerado valores de altura en los que finaliza el proceso de la precipitación dentro de los siguientes límites que corresponden a condiciones inhibidoras y potenciadoras.

$$100 \leq HI \leq 1.000 \quad (m)$$

En la *Figura 4.4* se observa el efecto que sobre la velocidad máxima y a lo largo del tiempo tiene la altura inferior del núcleo de la descendencia. En este caso, para los valores más altos del límite inferior del núcleo de enfriamiento y en la condición inhibidora, se observa un crecimiento sostenido y paulatino de la velocidad máxima en el margen de los tiempos usuales de formación del Microburst, mientras que la condición potenciadora estimula energícamente el proceso descendente en tiempos muy cortos y con alturas inferiores del núcleo de enfriamiento en su menor rango. El desarrollo de la condición inhibidora indica que en la evolución de la velocidad máxima tiene mayor relevancia el efecto del enfriamiento que el tamaño del núcleo de la descendencia, pasando de existir diferencias de velocidad de 10 m s^{-1} en el instante correspondiente a 400 s a más de 34 m s^{-1} en el tiempo de 450 s. En la condición potenciadora se observa que para valores mayores en la generatriz del cilindro de enfriamiento, las variaciones entre las velocidades máximas se hacen mayores y en tiempos relativamente más limitados, ya que mientras en el instante 250 s se tiene 5.5 m s^{-1} como diferencia incremental de velocidades, este gradiente aumenta hasta 14 m s^{-1} en el instante 300 s del desarrollo del Microburst. Estos resultados son coherentes con los obtenidos para el caso de la parametrización de la altura superior del cilindro de enfriamiento.

Teniendo en cuenta los valores obtenidos y para las características más usuales del desarrollo real del fenómeno, la altura de la base

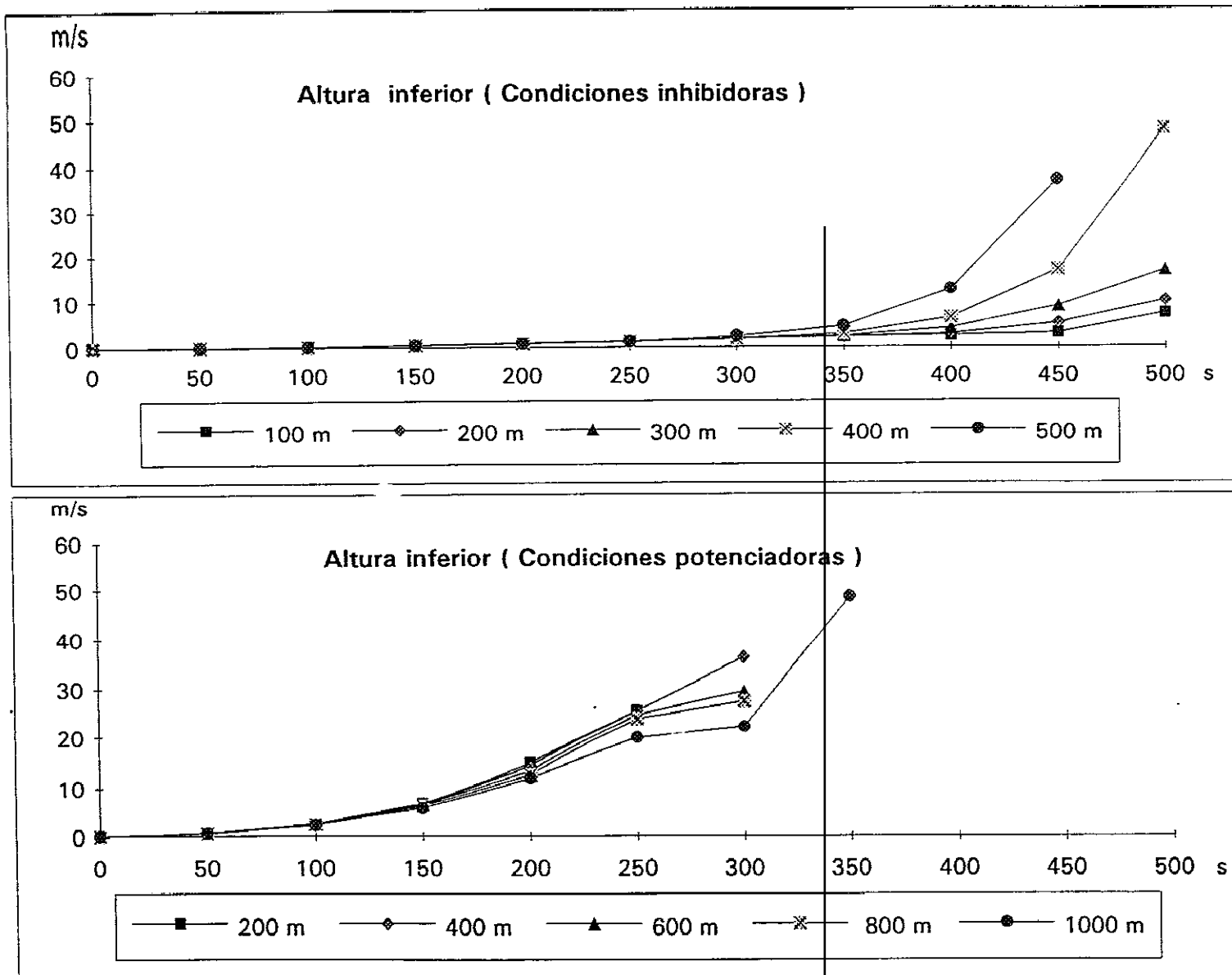


Fig. 4.4 : Velocidad máxima en función del tiempo para el parámetro altura de la base inferior del cilindro de enfriamiento.

inferior del núcleo de la descendencia se sitúa en:

$$HI = 400 \text{ m}$$

c.3) Radio del cilindro del núcleo de enfriamiento

Para recoger las dos condiciones extremas reflejadas como inhibidoras y potenciadoras, se han establecido como límites de variación del radio del cilindro los siguientes valores:

$$300 \leq R \leq 700 \quad (m)$$

En la *Figura 4.5* quedan reflejadas las magnitudes de las velocidades máximas de desarrollo del Microburst en función del tiempo y para las condiciones indicadas. Se observa que la condición potenciadora provoca una inestabilidad divergente del fenómeno en tiempos de desarrollo muy cortos, en tanto que con la condición inhibidora se producen valores adecuados de velocidad máxima a lo largo de la vida media del Microburst, existiendo una cierta coincidencia de resultados para los distintos valores del radio del núcleo de la descendencia. Es decir los valores de las velocidades máximas dependen muy poco del radio de la descendencia excepto para tiempos de desarrollo muy grandes. No obstante, y de forma poco significativa, se obtienen valores máximos de velocidad ligeramente superiores cuando se estudian descendencias con radios del cilindro del núcleo de enfriamiento más pequeños, con lo que puede considerarse, que las velocidades máximas en los instantes de tiempo más altos, vienen asociadas a la interacción del flujo descendente con la corriente del *outflow* que

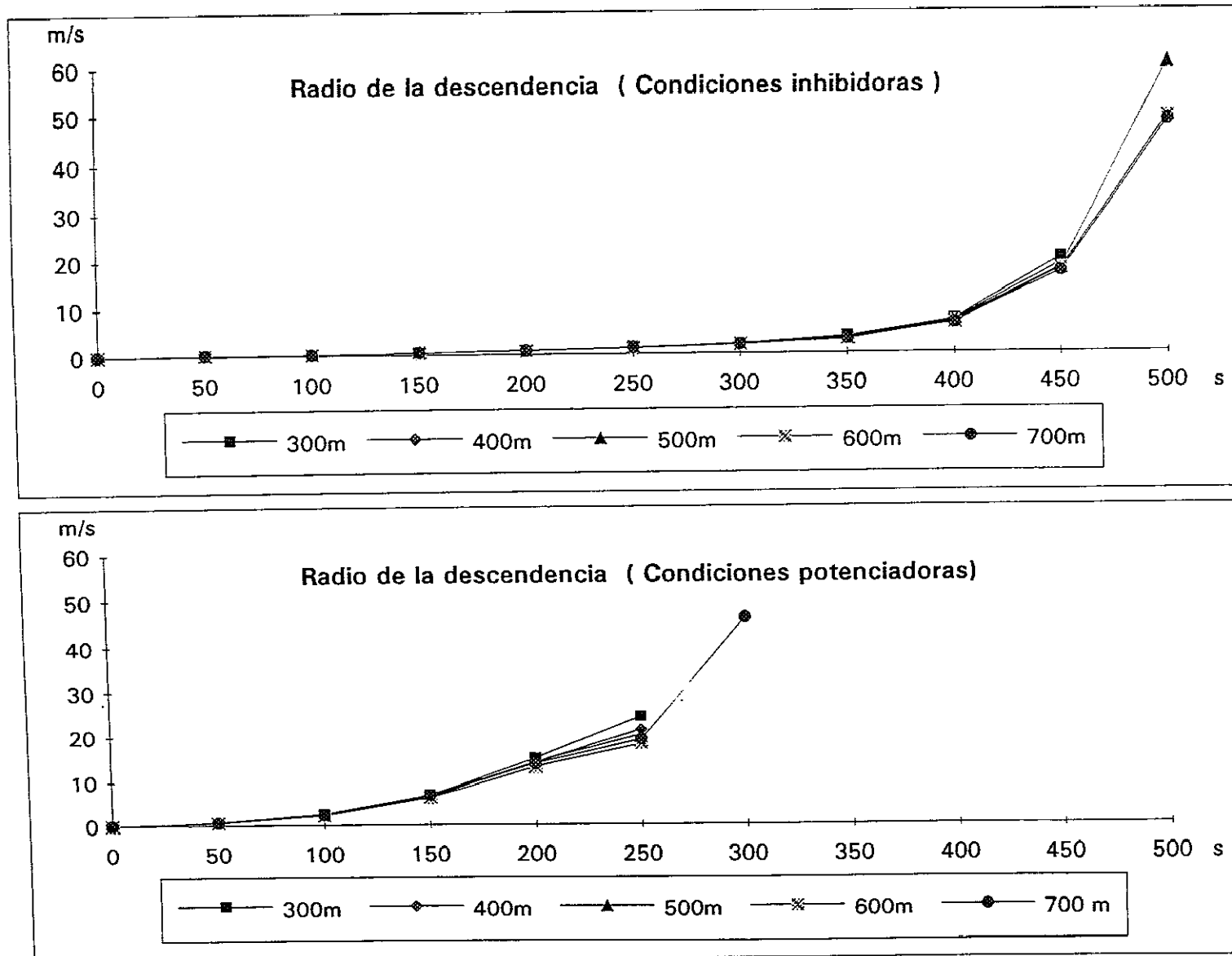


Fig. 4.5 : Velocidad máxima en función del tiempo para el parámetro radio del cilindro del núcleo de enfriamiento.

se inyecta a la corriente vertical descendente.

Analizando las gráficas correspondientes tanto a las condiciones inhibitoras como potenciadoras, se observa un gradiente muy moderado en la evolución de las velocidades máximas, pasando de menos de 1 m s^{-1} en el instante 400 s a 2.5 m s^{-1} en el instante 450 s para la condición inhibitora, y de forma semejante para la condición potenciadora, pasando de una variación de 1 m s^{-1} para el instante 200 s a 5 m s^{-1} en el instante 250 s , en todo el rango de variación del parámetro analizado. En consecuencia se puede determinar, que el radio del cilindro del núcleo descendente no ejerce mucha influencia sobre los valores de las velocidades máximas, porque el enfriamiento se produce en cada celda del núcleo y por tanto el tamaño del radio no afecta a esta condición. Sin embargo, sí es relevante en cuanto a la extensión horizontal del fenómeno, puesto que Microburst con mayores radios del núcleo de la descendencia producen efectos más notables en distancias más alejadas del eje de simetría del Microburst.

Así pues teniendo en cuenta estas características y los valores sobre observaciones realizadas (Hjelmfelt, 1988) se adopta para el radio del cilindro un valor de:

$$R = 600 \text{ m}$$

d) Temperatura inicial a nivel de la superficie del terreno

Continuando con la metodología de analizar la influencia que sobre el modelo en estudio tiene la variación de las magnitudes del parámetro considerado, se han producido variaciones de la temperatura inicial a nivel del suelo entre los valores:

$$275 \leq T \leq 298 \quad (K)$$

que corresponden por un lado a condiciones potenciadoras del fenómeno, y por otro a condiciones inhibidoras. En la *Figura 4.6* se puede apreciar que la variación de temperatura inicial a nivel del suelo tiene muy poca relevancia en el desarrollo del Microburst. Se observa que cuando se establece la condición potenciadora se produce una divergencia notable en el fenómeno en estudio, en tanto que la condición inhibidora permite desarrollos de Microburst más acordes con la realidad. No obstante tanto en uno como en otro caso la influencia del parámetro temperatura no es significativo en sí mismo, dentro de los límites normales de temperatura a nivel de suelo para que los que puede producirse el fenómeno del Microburst, aunque analizando ambas condiciones se observan ligeros crecimientos de las velocidades para temperaturas más bajas, aspecto que está condicionado por la mayor densidad del aire que produce fenómenos descendentes algo más intensos. Así pues se toma como valor de la temperatura al inicio del proceso el valor de:

$$T = 293 \text{ K}$$

e) Presión inicial a nivel de la superficie del terreno

De manera semejante a como ha sido tratado el parámetro temperatura,

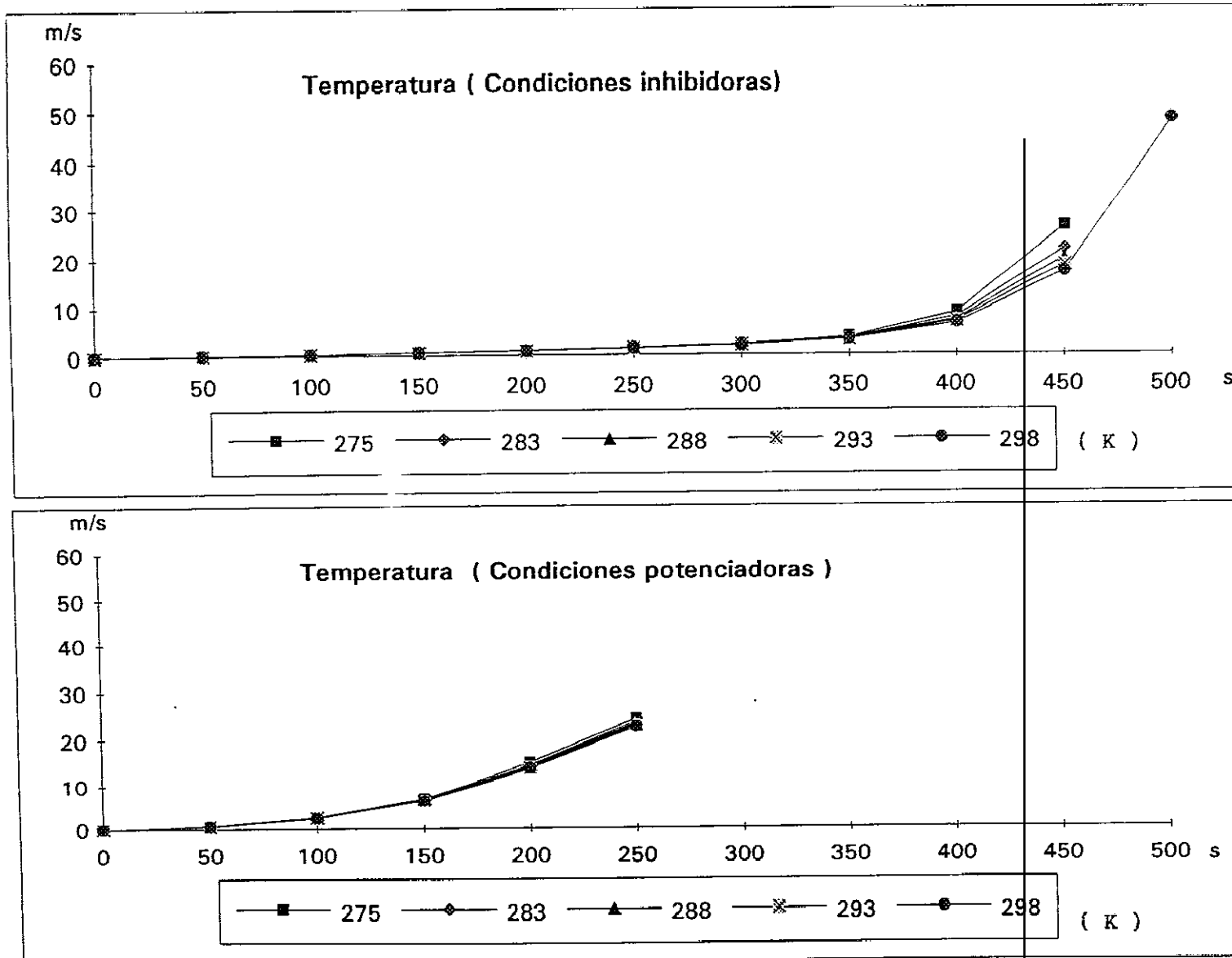


Fig. 4.6 : Velocidad máxima en función del tiempo para el parámetro temperatura inicial a nivel de la superficie del terreno.

se ha considerado la característica de la presión existente a nivel de suelo al comienzo del proceso de la descendencia. Se han establecido los límites en la variación del parámetro teniendo en cuenta tanto las condiciones inhibitoras como las condiciones potenciadoras, situándose el rango de fluctuación en los siguientes valores:

$$100.000 \leq P \leq 88.000 \quad (Pa)$$

En la *Figura 4.7* queda configurado el efecto de la variación de presión a lo largo del tiempo de formación del Microburst, sobre los valores de las velocidades máximas del desarrollo del fenómeno. No se aprecia prácticamente ninguna influencia sobre la intensidad de la descendencia al realizar el estudio de la variabilidad del parámetro, comprobándose únicamente, que en la condición potenciadora el mecanismo de actuación presenta una alta divergencia para tiempos de funcionamiento relativamente cortos.

Por tanto, teniendo en cuenta los valores más usuales que se verifican para el proceso estudiado, se adopta para el valor inicial de la presión al nivel del suelo al comienzo del proceso descendente:

$$P = 97.000 \quad Pa$$

A continuación se procede a reflejar en la siguiente tabla un resumen de los límites utilizados tanto en las condiciones inhibitoras como potenciadoras de los parámetros que influyen sobre el mecanismo de producción y desarrollo del Microburst. Asimismo se indica cual es el valor que se considera más adecuado para proceder a la modelización del fenómeno, y que se estima como el óptimo

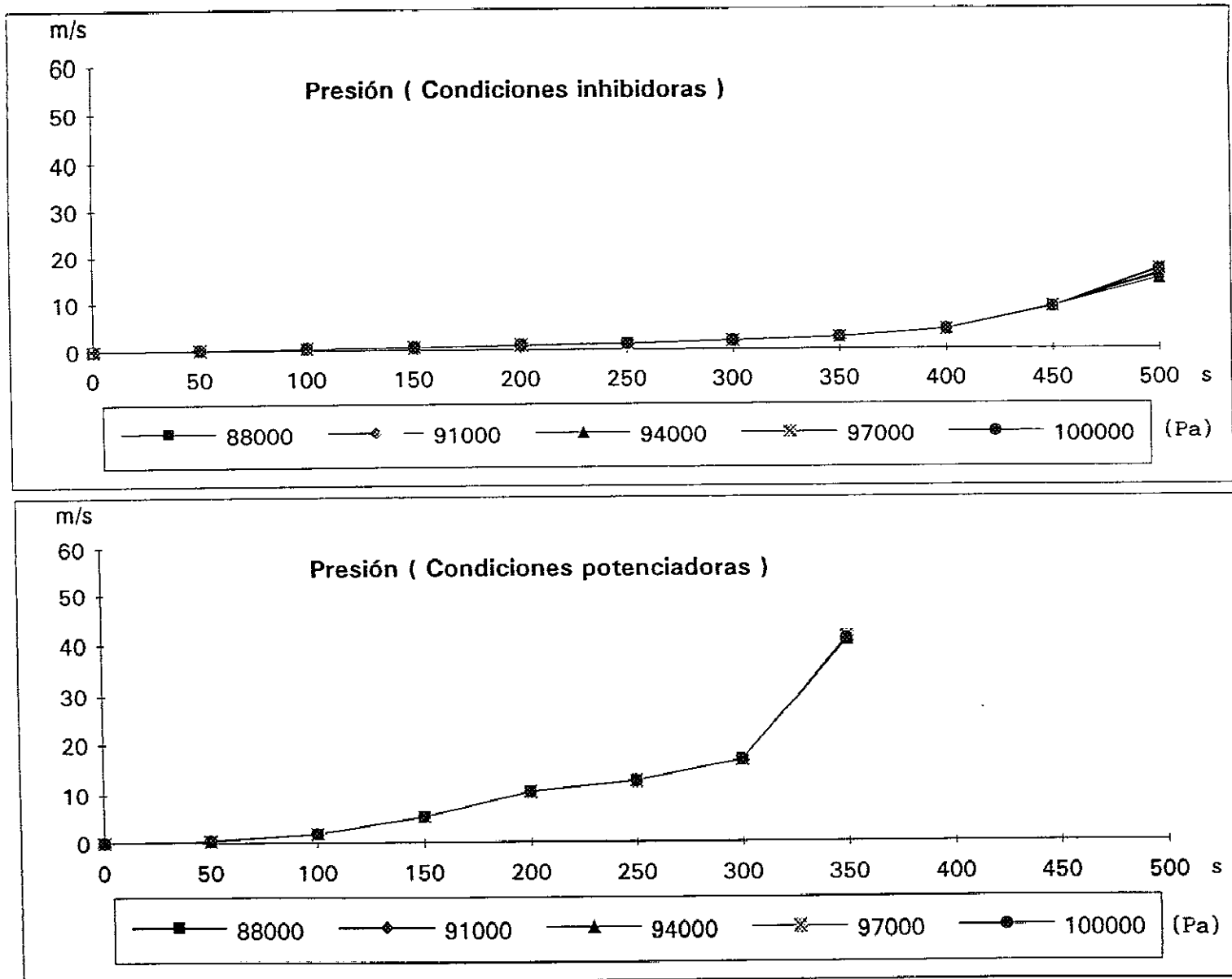


Fig. 4.7 : Velocidad máxima en función del tiempo para el parámetro presión inicial a nivel de la superficie del terreno.

a efectos de una simulación más concordante con la realidad.

| PARAMETRO | INHIBIDOR | POTENCIADOR | VALOR OPTIMO |
|---|-----------|-------------|--------------|
| $\frac{dT}{dt}$ (K s ⁻¹) | - 0.005 | - 0.025 | - 0.01 |
| n | 1.2 | 1.6 | 1.5 |
| R (m) | 700 | 300 | 600 |
| HS (m) | 700 | 1.900 | 1.600 |
| HI (m) | 400 | 100 | 400 |
| T (K) | 298 | 275 | 293 |
| P (Pa) | 100.000 | 88.000 | 97.000 |

4.5.- PRESENTACIÓN DE RESULTADOS CON EL PROGRAMA UTILIZADO

La aplicación del código que estudia la simulación del fenómeno Microburst, permite visualizar en pantalla los datos referentes al comportamiento de las distintas variables: densidad, velocidad horizontal, velocidad vertical, temperatura y presión en función de la altura y a lo largo del tiempo. La presentación es una matriz de tantas filas como número de celdas se haya elegido en sentido vertical, y columnas con cada una de las variables referenciadas. Cada fila contiene por tanto los datos de una determinada altura estando ordenadas según alturas crecientes. La primera y la última fila contienen los datos de las *celdas fantasma*.

El código que representa gráficamente los resultados obtenidos para las velocidades del aire anteriormente calculadas, permite la visualización en pantalla y para el instante deseado, del campo de los vectores velocidad en cada una de las celdas del dominio considerado, pudiendo determinarse el valor de la velocidad máxima en el dominio en cada instante y en la situación correspondiente. Así pues una vez determinados los valores que se consideran óptimos para cada uno de los parámetros intervinientes en el fenómeno Microburst se ha procedido a la modelización del mismo.

Como ya se ha indicado anteriormente, se ha considerado un dominio con un límite espacial acotado de 2.000x2.000 m respecto al eje de simetría de la descendencia, que viene a estar clasificado en el límite inferior de los fenómenos descendentes observados. Se ha tomado este criterio, ya que lo que se pretende estudiar es si el código utilizado permite una representación adecuada del

desarrollo espacio-temporal del Microburst. También debe apuntarse que la existencia de datos sobre fenómenos reales observados es muy limitada y con una gran variabilidad en sus magnitudes puesto que existe una gran dispersión en los valores observados.

Se incluye al final de este punto las imágenes consecutivas del campo de velocidades del aire en cada intervalo considerado del experimento, colocando en el centro de cada celda el vector de la dirección y el módulo correspondientes al valor de la velocidad en ese punto. La secuencia del fenómeno se presenta para intervalos de tiempo de 25 segundos, frecuencia que se considera la más adecuada para una correcta visualización del proceso a lo largo del desarrollo del Microburst hasta el momento de su máxima intensidad. También se indica en cada representación secuencial cuál es el valor de la velocidad máxima en el dominio y la posición donde está localizada. De las múltiples experiencias realizadas, se puede afirmar que durante las primeras fases del desarrollo del Microburst los valores de las velocidades de descenso del flujo son muy bajas, ya que el efecto del enfriamiento no produce una intensificación apreciable de la descendencia y no se aprecia prácticamente cizalladura en su interior. A partir de un tiempo del orden de 200 s desde el inicio del fenómeno, se observa un apreciable incremento del flujo descendente y por tanto de las velocidades máximas que se tienen en el dominio estudiado. Así pues se inicia la presentación secuencial desde el instante indicado y con intervalos de 25 segundos hasta que se alcanza la intensidad máxima del Microburst, a partir de la cual comienza un proceso disipativo iniciándose el decaimiento del Microburst al hacerse más débil y menos organizado, produciéndose movimientos caóticos de la corriente fluida hasta la desaparición del fenómeno meteorológico.

En el instante 200 s puede observarse el inicio perfectamente marcado de la dirección del flujo de la corriente descendente dentro del núcleo de enfriamiento, mientras que en las proximidades pero fuera del núcleo, la corriente presenta dirección contraria preconfigurando el inicio del *outflow*. En las secuencias subsiguientes correspondientes a los instantes comprendidos entre 225 a 275 s queda notablemente marcada la corriente turbillonaria en el borde del núcleo descendente, generándose un torbellino con su centro en la posición (650, 850) del dominio considerado. Los valores de las velocidades máximas van aumentando progresivamente desde 4 hasta 8 m s⁻¹ y situándose en la posición (550, 750) del recinto en el que se simula el fenómeno de la descendencia a baja altura. En particular para el instante 250 s el posicionamiento más acusado de la descendencia se sitúa para la abscisa 550 m y en el intervalo de ordenadas comprendido entre 500 y 1.000 metros, en tanto que la ascendencia correspondiente queda situada para la abscisa 650 m y el intervalo de ordenadas comprendido entre 1.000 y 1.500 metros. También se observa que en la parte inferior del eje de la descendencia que comprende un cuadrado teórico de 500x500 m se tienen velocidades prácticamente nulas correspondientes a la zona de estancamiento. Por otro lado la máxima velocidad horizontal se presenta en la posición (650, 450) con valores incrementales de velocidad horizontal entre los dos lados del eje de la descendencia de $\Delta V = 7 \text{ m s}^{-1}$ y en puntos situados a una distancia de 1.300 m entre sí. El límite de la zona de *outflow* está en $x = 1.100 \text{ m}$ aproximadamente, con lo que el desarrollo completo del Microburst en sentido horizontal abarca una distancia del orden de los 2.200 m.

La situación correspondiente al instante 300 s muestra cómo la corriente descendente que ha aumentado su intensidad alcanza la superficie del terreno

y se produce un inicio de zona de estancamiento debajo del centro de la descendencia, con lo que empieza a generarse un gradiente de presión desde abajo que hace que la corriente aumente de anchura y desarrolle vorticidad. La velocidad máxima, del orden de 9 m s^{-1} , está situada en la posición (550, 750) del dominio en estudio y comienza el desarrollo más enérgico del *outflow* que sitúa el centro del torbellino en la posición (650, 850) con una ligera tendencia indicativa del proceso de horizontalización del *outflow*, tendencia que se verá reforzada con el paso del tiempo. La máxima velocidad horizontal de 6.5 m s^{-1} situada en la posición (650, 550) establece un valor incremental de velocidad horizontal del flujo a ambos lados del eje del Microburst de $\Delta V = 13 \text{ m s}^{-1}$ en puntos situados a una distancia de 1.300 m entre sí, abarcando el desarrollo completo del fenómeno en el sentido horizontal una distancia del orden de 2.800 m. La máxima velocidad vertical descendente de valor 6.5 m s^{-1} está situada en la posición (350, 1.000) en tanto que la velocidad vertical ascendente de valor 4.5 m s^{-1} se sitúa en el punto (950, 750) del dominio. La altura de la zona de expansión del *outflow* es del orden de los 700 m.

En el instante 325 s hay una intensificación de todas las magnitudes más relevantes del Microburst. La corriente turbillonaria presenta una mayor organización, y debido a la rotación del flujo se produce un aporte de fluido hacia el núcleo de la descendencia. Se observa claramente divergencia horizontal de la corriente, puesto que el Microburst ha alcanzado la superficie con alta intensidad. Por otro lado, la velocidad máxima que se mantiene en la misma posición que en los instantes anteriores, alcanza el valor de 9.7 m s^{-1} indicando con ello el incremento de la intensidad que va alcanzando el Microburst.

En este momento queda mucho más marcado el proceso de la horizontalidad del *outflow* que ya se había iniciado en los instantes precedentes, situándose el centro del torbellino en la posición (650, 850). Por otro lado la zona de estancamiento que se tiene en el centro del flujo descendente y en las cercanías del terreno disminuye de tamaño, reduciéndose a un cuadrado virtual de 300x300 m a partir del origen de coordenadas, el cual se continúa con una zona limítrofe en la que se producen oscilaciones de la masa de fluido en la zona comprendida entre las coordenadas (350, 450) y (950, 450) del dominio en estudio. La máxima velocidad horizontal de 8 m s^{-1} situada en la posición (650, 550) determina un incremento de la velocidad horizontal del flujo a ambos lados del eje del Microburst de $\Delta V = 16 \text{ m s}^{-1}$ para puntos situados a 1.300 m de distancia horizontal, y que están ubicados simétricamente respecto al eje de la descendencia. La dimensión correspondiente al desarrollo completo del fenómeno en sentido horizontal, abarca una distancia de 3.000 m y una altura vertical en la zona del *outflow* de 700 m. En cuanto a los valores de las máximas velocidades verticales, se tiene para el caso de flujo ascendente 4 m s^{-1} en la posición (650, 1.050) y para el caso de flujo descendente 6 m s^{-1} en la posición (550, 650) del dominio considerado.

A partir del instante 350 s el *outflow* crece de tamaño desarrollando un rotor horizontal, y apreciándose nítidamente el efecto de la zona de estancamiento que va reduciendo sensiblemente su tamaño por el efecto del chorro descendente que incide sobre el terreno. Colateralmente a esta zona de estancamiento le sigue otra en la que la corriente sufre oscilaciones debido al efecto combinado de las acciones del *outflow* y de la zona de remanso, estando su área de influencia confinada a las coordenadas (450, 550) y (950,550) del

dominio. Se aprecia claramente definida la convergencia hacia el núcleo del Microburst, seguido del flujo descendente y el torbellino formado con una fuerte tendencia a la horizontalidad que produce una inyección de corriente fluida hacia el núcleo de la descendencia. La posición en la que se tiene la velocidad máxima del flujo inicia su descenso, acercándose al suelo al tiempo que se aleja del eje del Microburst, pero el módulo de la velocidad aumenta alcanzando los 10 m s^{-1} de velocidad máxima en la posición (650, 650). La distancia entre los puntos simétricos donde se alcanza el máximo incremento de velocidad horizontal de $\Delta V = 21 \text{ m s}^{-1}$ es de 1.400 m, con lo que el desarrollo total de fenómeno incluida la zona de *outflow* abarca unos 3.000 m de longitud. Por otro lado la velocidad vertical máxima ascendente situada en el punto (1.050, 750) tiene un valor de 7 m s^{-1} mientras que en el caso descendente la velocidad de 9 m s^{-1} se tiene en la posición (350, 850).

El efecto del crecimiento de la intensidad de la corriente descendente, provoca que la acción de rebote del flujo contra la superficie del terreno, afecte a la divergencia horizontal de la corriente en la parte inferior del *outflow* como se observa en la secuencia correspondiente a 375 s, donde la velocidad máxima que alcanza $12,5 \text{ m s}^{-1}$ se sitúa en la posición (650, 350) con un claro descenso hacia las zonas bajas del Microburst. Por otro lado existe una notable interrelación entre el núcleo de la descendencia y la corriente turbilhonaria que se produce en el borde interno del *outflow*, situación que provoca el inicio de procesos caóticos en el comportamiento del flujo y que anticipan una gran complejidad en la estructura del mismo.

La zona de estancamiento situada en la parte inferior del centro del

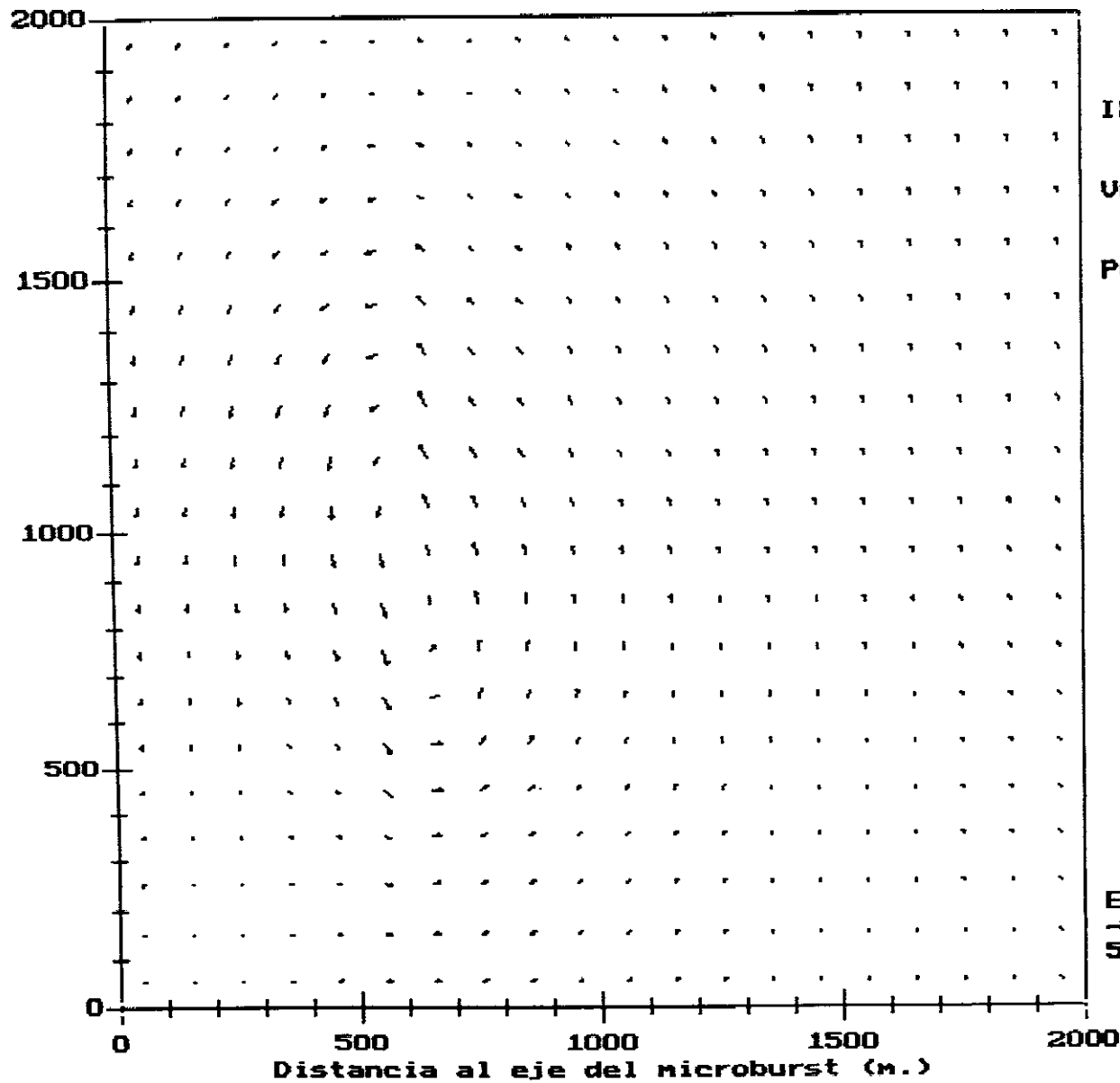
Microburst queda notablemente reducida, pasando a producirse sin solución de continuidad un área de fluido con movimientos oscilatorios fluctuantes que crece de tamaño respecto al intervalo anterior, y abarca una zona comprendida entre las coordenadas (250, 500) y (1.050, 500). El *outflow* que adopta una disposición claramente horizontal tiene su núcleo central en la posición (750, 750) con una inyección enérgica de flujo sobre la corriente vertical descendente. La máxima velocidad horizontal de 12 m s^{-1} situada en la posición (750, 650) establece una diferencia incremental de velocidad horizontal del flujo a ambos lados del eje del Microburst de $\Delta V = 24 \text{ m s}^{-1}$ en puntos situados a una distancia de 1.500 m entre sí. El tamaño en sentido horizontal del desarrollo completo del fenómeno estudiado comprende una longitud de 3.400 m, siendo la altura de la zona de expansión del *outflow* del orden de los 600 m. Debido a la gran inyección de flujo que el *outflow* introduce en la corriente descendente, se alcanzan velocidades verticales máximas de 11 m s^{-1} en sentido descendente y en la posición (150, 950), en tanto que la máxima velocidad vertical ascendente de 8 m s^{-1} se sitúa en la coordenada (1.150, 750) del dominio.

En el instante 400 s el Microburst ha alcanzado su máxima intensidad, con valores de velocidad máxima superiores a 16.5 m s^{-1} en la posición (750, 350) del dominio analizado. Los efectos combinados de la corriente descendente, de la corriente turbillonaria muy intensa del desarrollo del *outflow*, y de las corrientes secundarias producidas por el efecto suelo, descomponen a partir de este instante la estructura claramente definida en los intervalos anteriores, provocando la descomposición del fenómeno Microburst hasta su total disipación, en el supuesto que desaparezca el forzamiento que dio origen a la

descendencia. Prácticamente el movimiento se vuelve caótico, pudiendo apreciarse en la parte próxima al terreno, corrientes oscilantes que se desarrollan en sentido horizontal y que se entremezclan con las capas fluidas inferiores del *outflow*.

La velocidad horizontal máxima que desciende hacia las proximidades del terreno de forma muy acusada, alcanza el valor de 18 m s^{-1} y se sitúa en la posición (750, 350), con lo que la variación incremental de velocidades horizontales a ambos lados del eje del Microburst es $\Delta V = 36 \text{ m s}^{-1}$ en puntos situados a 1.600 m de distancia entre sí y con simetría respecto al eje de la descendencia. En esta situación en la que se tiene el desarrollo del Microburst con su máxima intensidad, la distancia horizontal en la que se mantiene su influencia es de 3.800 m. A partir del instante considerado anteriormente y habiendo finalizado el forzamiento del enfriamiento que provoca la descendencia, el Microburst inicia su descomposición produciéndose la disipación del mismo al hacerse más débil y menos organizado durante los siguientes instantes, y perdiendo rápidamente la altura total del *outflow*.

Altura (m.)



INSTANTE 200 s

$U_{max} = 3.53 \text{ m/s}$

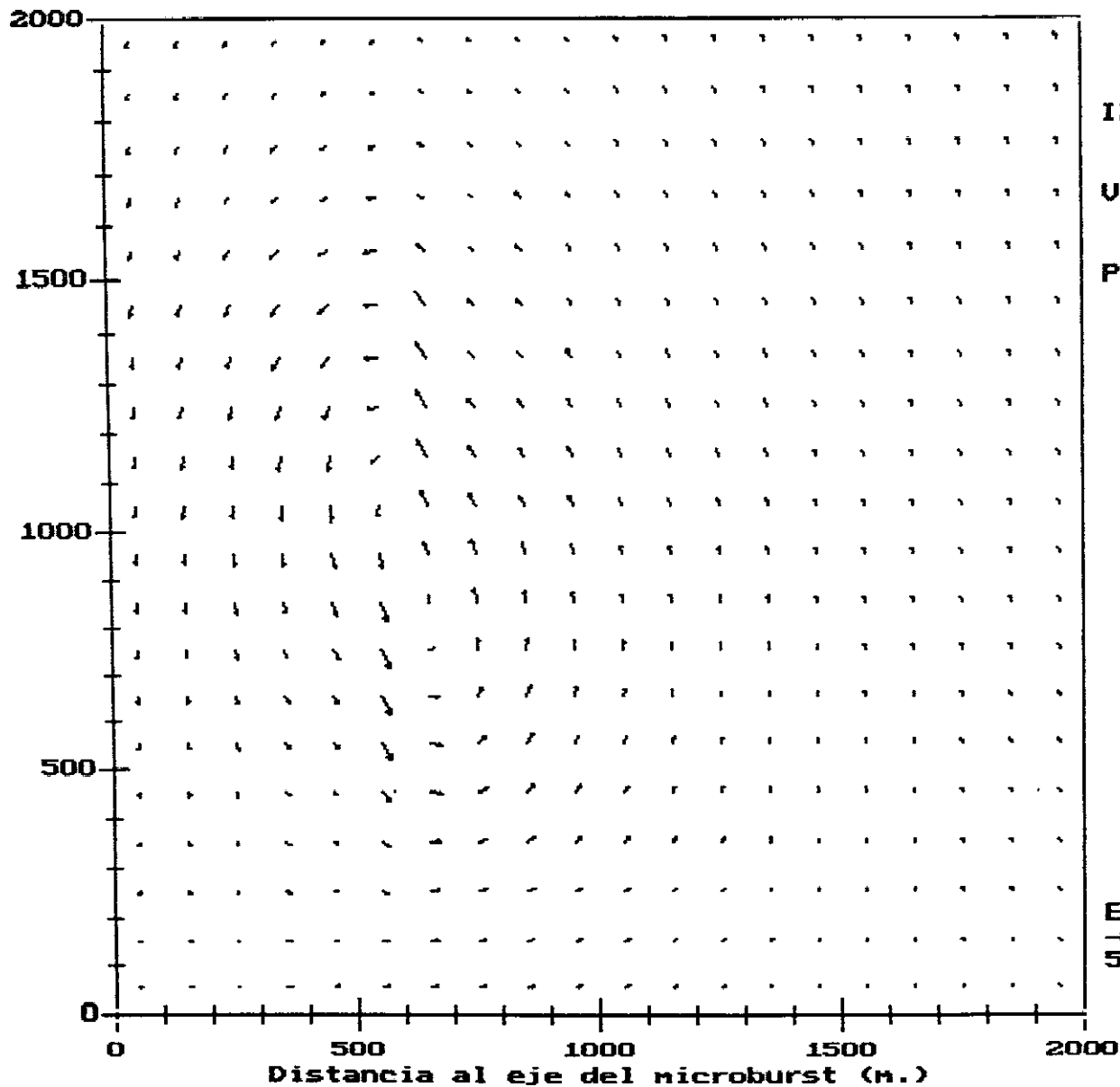
POSICION (550,750)

ESCALA



5 m/s

Altura (m.)



INSTANTE 225 s

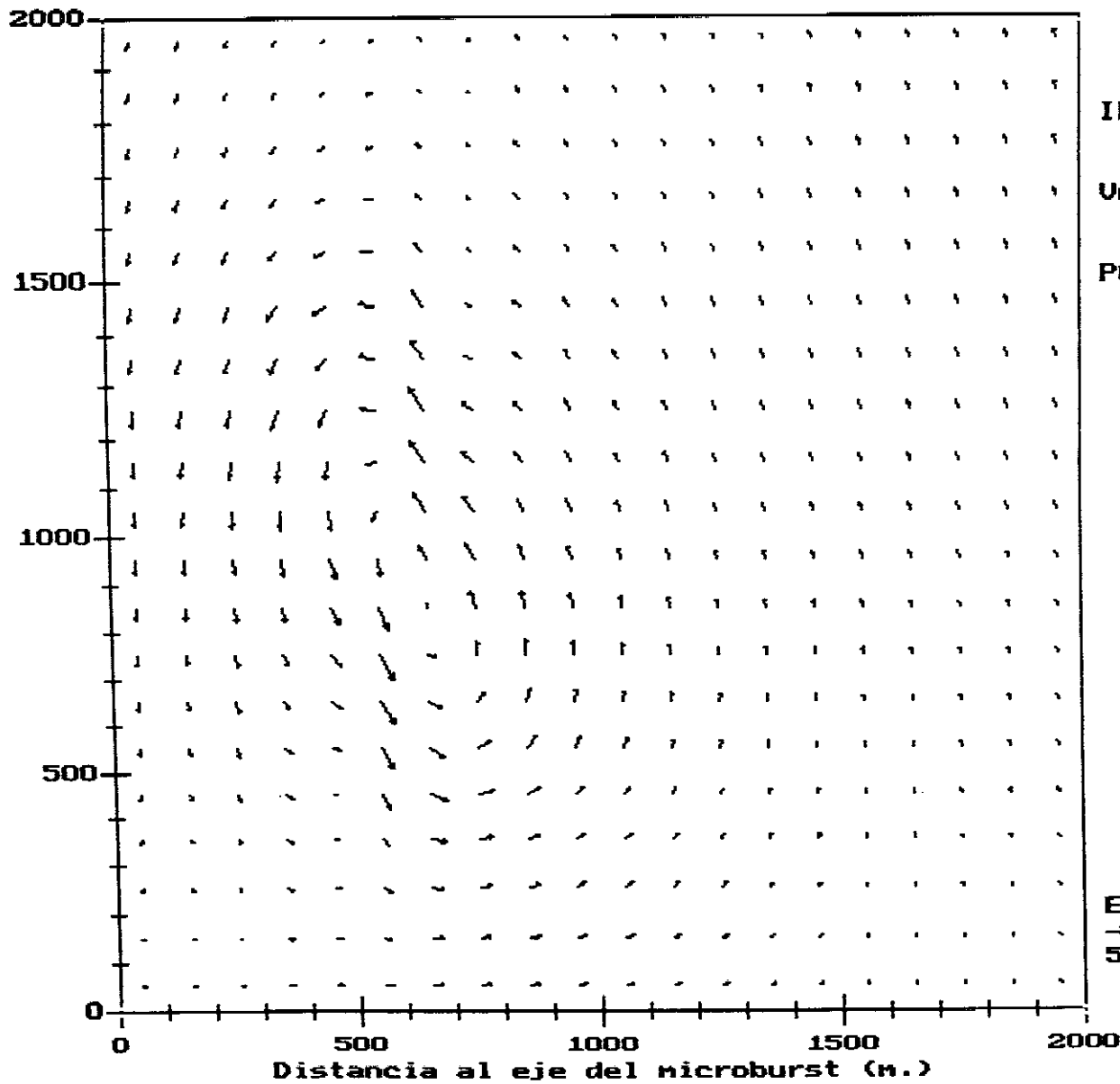
$U_{max} = 4.93 \text{ m/s}$

POSICION (550,750)

183

ESCALA
→
5 m/s

Altura (m.)



INSTANTE 250 s

$U_{max} = 6.51 \text{ m/s}$

POSICION (550,750)

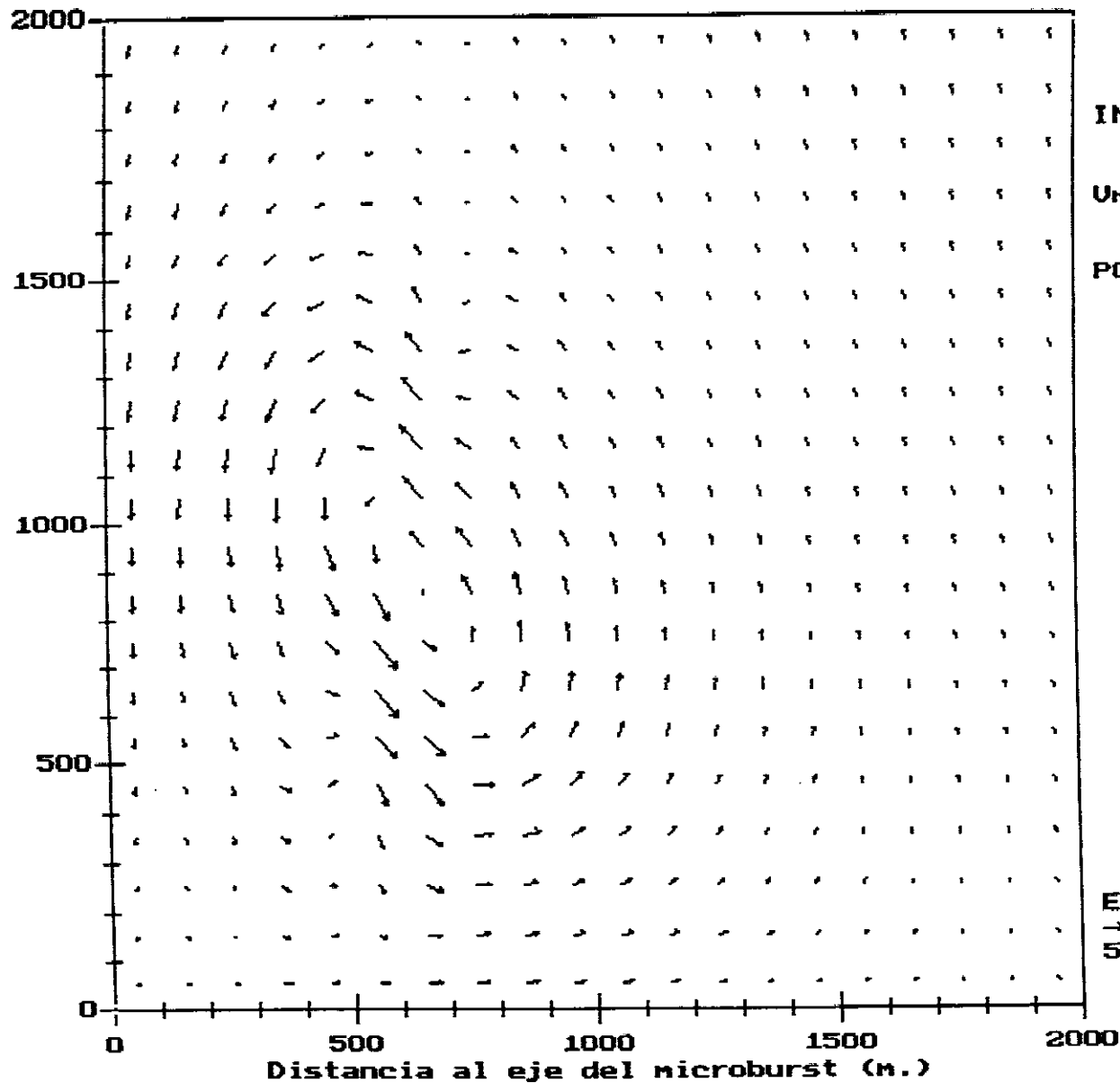
ESCALA

→
5 m/s

184

Altura (m.)

185



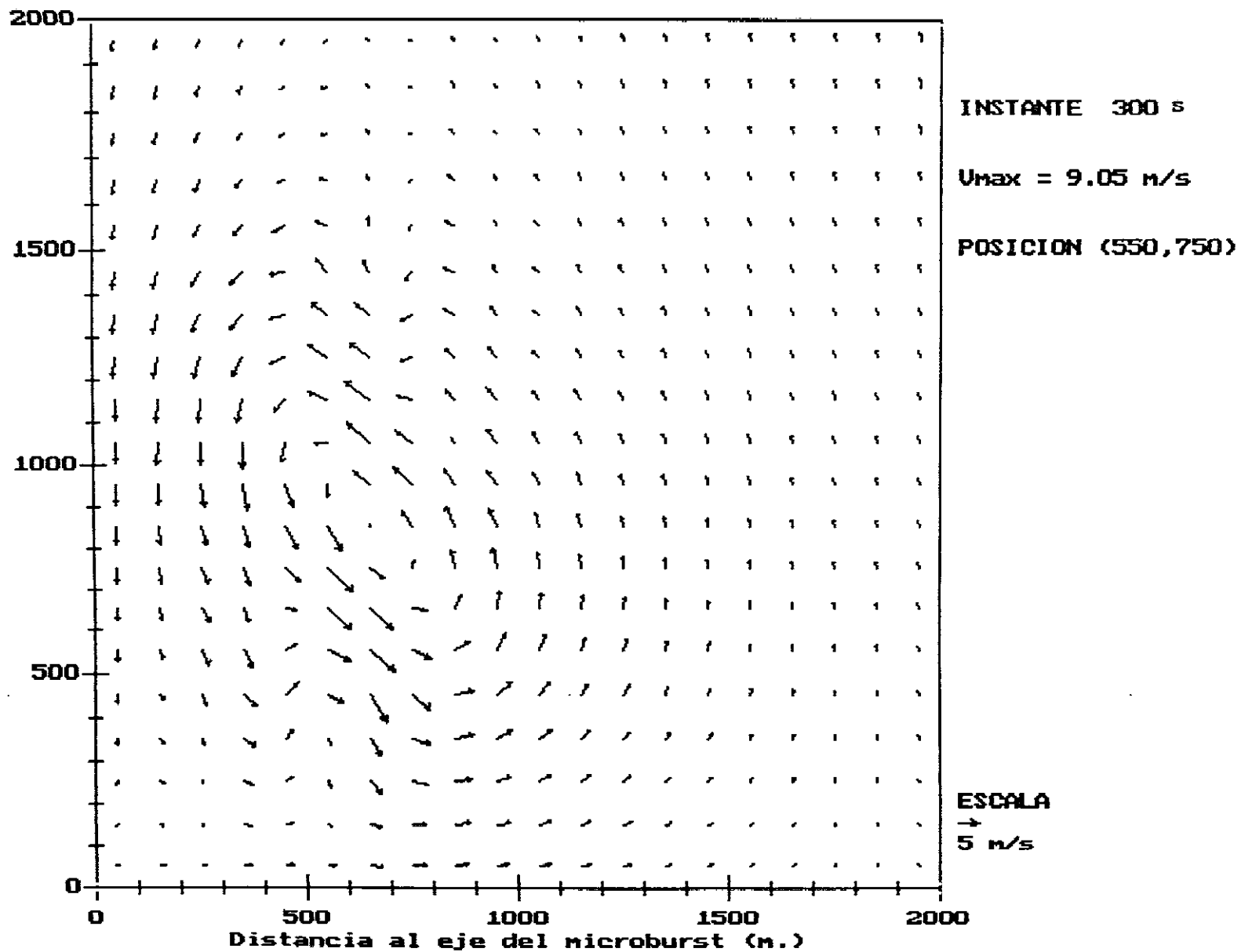
INSTANTE 275 s

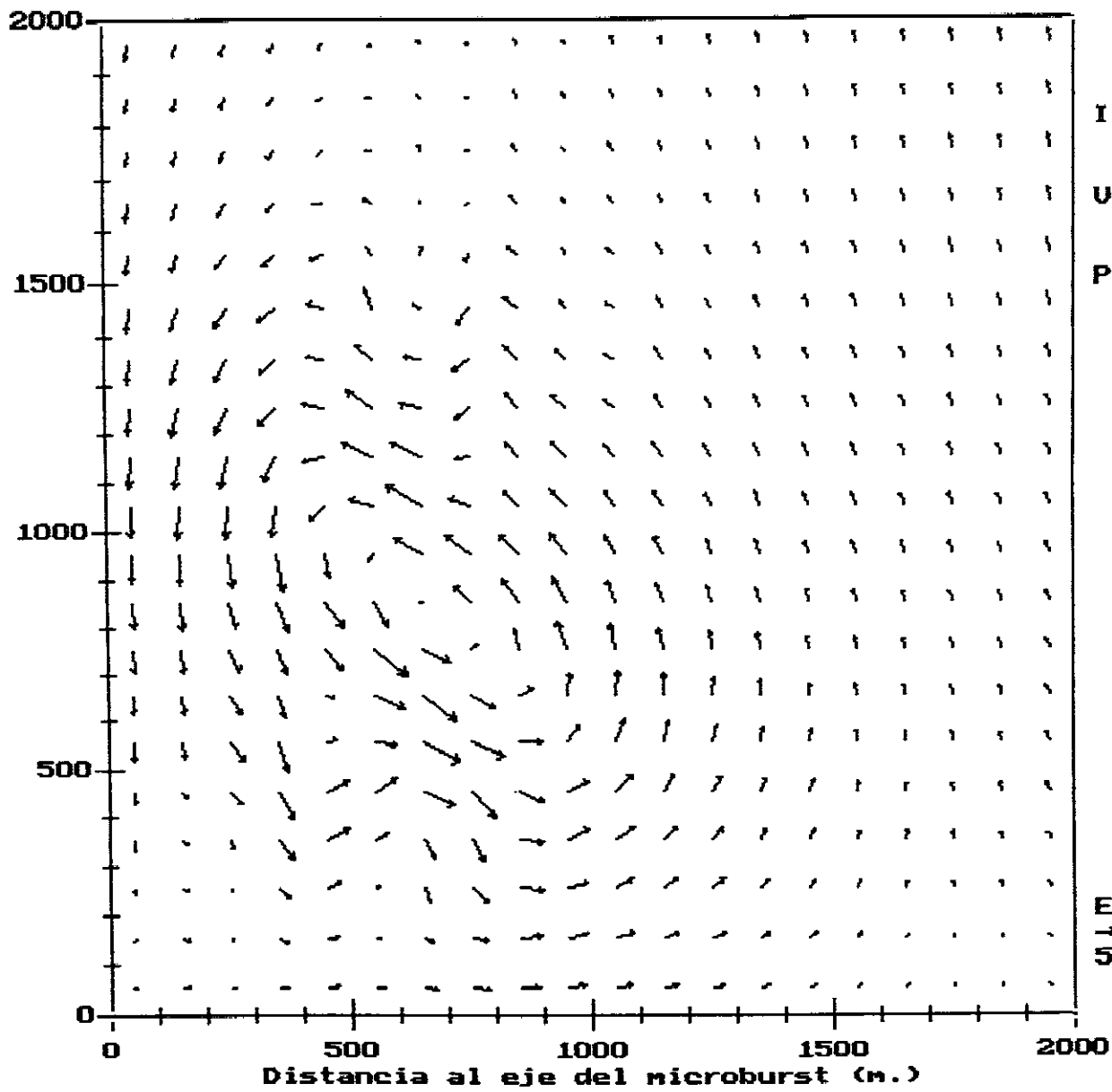
$U_{max} = 7.93 \text{ m/s}$

POSICION (550, 750)

ESCALA

→
5 m/s





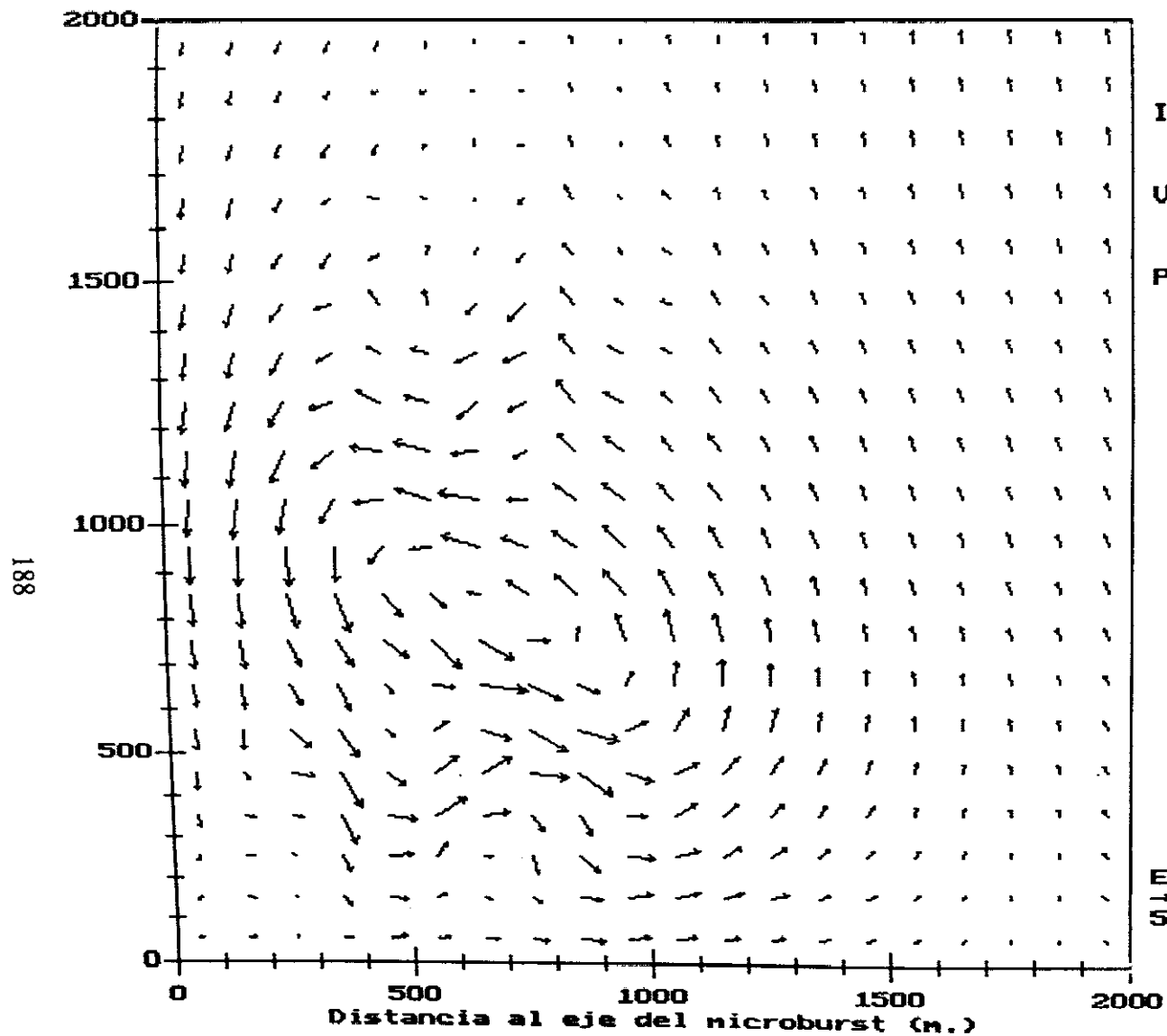
INSTANTE 325 s

U_{max} = 9.71 m/s

POSICION (550,750)

ESCALA
→
5 m/s

Altura (m.)



INSTANTE 350 s

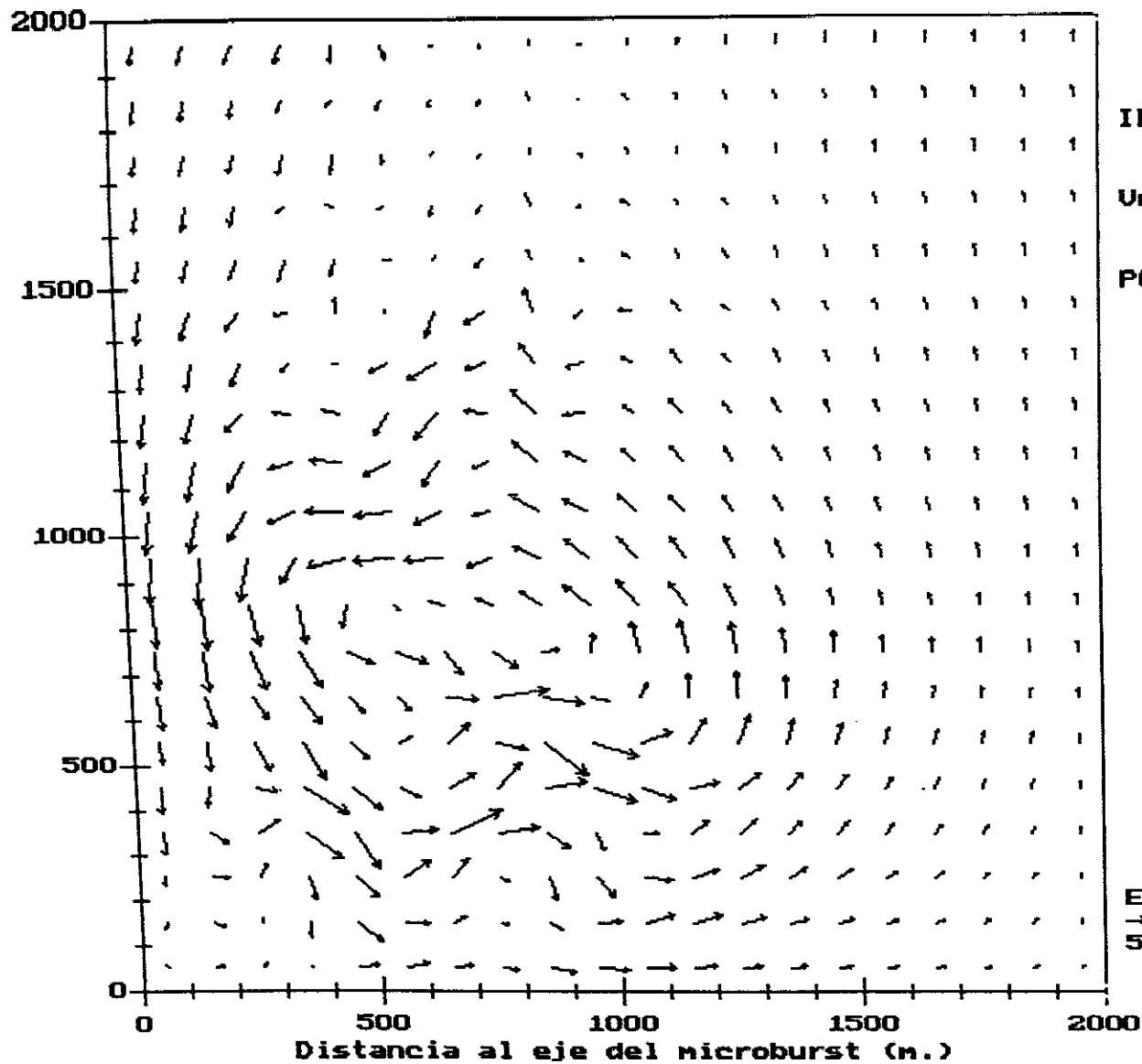
$U_{max} = 10.19 \text{ m/s}$

POSICION (650,650)

ESCALA
→
5 m/s

188

Altura (m.)



INSTANTE 375 s

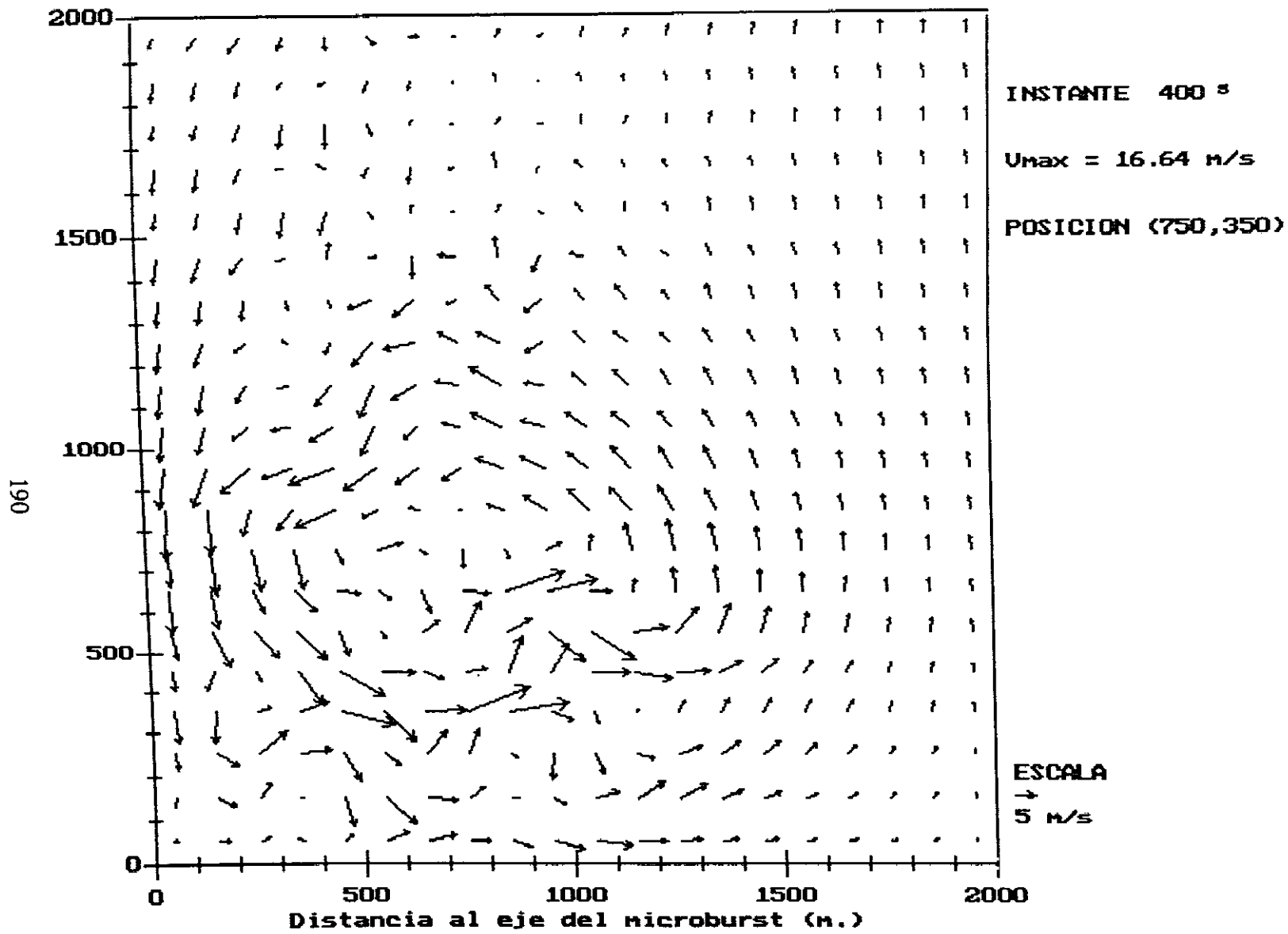
$U_{max} = 12.51 \text{ m/s}$

POSICION (650,350)

ESCALA

→
5 m/s

Altura (m.)



CAPÍTULO 5

EFECTO DEL MICROBURST SOBRE LAS AERONAVES

SÍMBOLOS EMPLEADOS

- A** alargamiento
b envergadura
C_L coeficiente de sustentación del avión
C_D coeficiente de resistencia del avión
C_M coeficiente de momentos del avión respecto al eje OZ
c cuerda media aerodinámica
D fuerza de resistencia aerodinámica

$\frac{d\mathbf{v}_s}{dt}$ aceleración lineal del avión

$\frac{d\boldsymbol{\omega}}{dt}$ aceleración angular del avión

- E** empuje proporcionado por la planta propulsora
F_A fuerzas aerodinámicas
i_T ángulo formado por el eje de la planta propulsora respecto al eje longitudinal del avión
L fuerza de sustentación aerodinámica
M momento de las fuerzas sobre el eje OZ
m masa del avión
q presión dinámica
S superficie alar
s posición del avión considerado en su centro de gravedad respecto a ejes inerciales

| | |
|------------|---|
| V_r | velocidad del avión considerado en su centro de gravedad respecto al aire |
| V_s | velocidad del avión considerado en su centro de gravedad respecto a ejes inerciales |
| V_v | velocidad del viento respecto a ejes inerciales |
| ω | velocidad angular del avión |
| W | peso del avión |
| α | ángulo de ataque |
| θ | ángulo formado por el eje longitudinal del avión respecto a la horizontal |
| γ | ángulo de descenso del avión |
| γ_r | ángulo formado por la dirección de la velocidad del avión respecto al aire |
| γ_s | ángulo formado por la dirección de la velocidad del avión respecto a ejes fijos a la superficie |

5.1.- INTRODUCCIÓN

Una aplicación concreta e importante de los efectos del fenómeno meteorológico estudiado, es la influencia que tiene sobre los aspectos de la seguridad aérea cuando una aeronave en fase de aproximación al aeropuerto es afectada por un Microburst. Al producirse variaciones bruscas tanto en dirección como en módulo de la velocidad del viento debido al efecto del Microburst, se originan cambios imprevistos del movimiento del aire alrededor de las superficies sustentadoras del avión. En tanto en cuanto la aeronave está en el aire, la influencia del efecto del Microburst sobre la estructura del avión puede ser notable pero en ningún momento reviste caracteres peligrosos, ya que previamente, en el diseño estructural se han tenido en cuenta los criterios y procedimientos para garantizar altos índices de seguridad y gran capacidad de tolerancia al daño estructural.

Sin embargo, el efecto de la cizalladura tiene sus consecuencias más peligrosas cuando la aeronave se encuentra cercana al suelo en operaciones de despegue y aterrizaje, por cuanto se modifica repentinamente la trayectoria del avión, y éste tiene menor capacidad de maniobra para responder a disminuciones bruscas de la sustentación aerodinámica por cambios imprevistos de vientos de cara a vientos de cola. Si en estas condiciones, el avión desplazándose en las cercanías del suelo y a baja velocidad se ve sometido a una brusca cizalladura, puede variar muy rápidamente el ángulo de ataque de la corriente sobre el ala y consecuentemente la sustentación aerodinámica. Un cambio repentino en las fuerzas a que está sometido el avión puede hacer que cambie incontroladamente su trayectoria, con el grave riesgo de contactar con el suelo antes de que puedan

realizarse acciones correctoras por el piloto.

5.2.- OBJETIVOS DE LA SIMULACIÓN

Se pretende analizar el comportamiento de una aeronave sometida bruscamente a la actuación de turbulencias descendentes a baja altura mediante simulación numérica. Mediante la integración de las ecuaciones del movimiento del avión se determinará su posición y actitud en función del tiempo durante la fase de aproximación. Puesto que la representación del campo de velocidades del Microburst que se ha estudiado anteriormente se ha realizado en forma bidimensional, también en la simulación se mantendrá esta misma condición. Esto no representa ningún problema puesto que al ser plana la trayectoria teórica seguida en la fase de aproximación al aterrizaje, lo que se pretende determinar es la diferencia de alturas entre la trayectoria teórica y la trayectoria real, para lo cual se analizarán los movimientos y giros de la aeronave en su plano de simetría.

La trayectoria teórica es rectilínea, con un ángulo y velocidad de descenso constantes y deberá coincidir con la trayectoria real si la atmósfera estuviera en equilibrio. A lo largo de la simulación se mantendrán los valores de empuje de los motores, posición de las superficies de control y de los dispositivos hipersustentadores que corresponderían a la trayectoria teórica, con lo que se realizará el estudio de la estabilidad longitudinal del avión con mandos fijos.

5.3.- EFECTO SOBRE LAS AERONAVES

Ya se ha comentado anteriormente que los mayores problemas que plantea la influencia del Microburst sobre las aeronaves se producen en las situaciones de despegue y aterrizaje debido a que corresponden a condiciones críticas del desarrollo del vuelo. En el caso del estudio de la influencia del fenómeno Microburst en la fase de despegue, se verifica que primeramente, el avión se ve sometido a un incremento del viento de cara que hace aumentar tanto la velocidad respecto al aire como la sustentación, pero una vez pasado el eje del Microburst la aeronave se ve sometida a un incremento del viento de cola que hace disminuir tanto la velocidad respecto al aire como la sustentación, provocando una trayectoria descendente del avión con posibilidades de una situación crítica como puede observarse en la *Figura 5.1*.

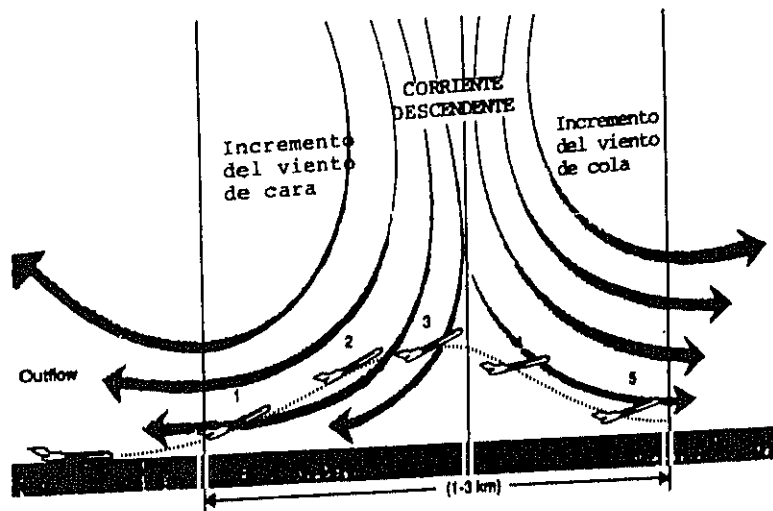


Fig. 5.1 : Efecto de la influencia del Microburst durante el despegue de una aeronave.

En el análisis de un encuentro típico con un Microburst durante la fase de aterrizaje, se evidencia un aumento de la corriente descendente y del viento en cola a lo largo de la trayectoria del vuelo de aproximación. El avión pierde velocidad lo que conlleva una disminución de la sustentación que hace aumentar el régimen de descenso, con lo que el avión puede tender a picar para volver a compensar la velocidad, cayendo por debajo de la senda de aproximación y contactando con el suelo antes del umbral de la pista. En la *Figura 5.2*, se ilustra esta situación indicándose la posibilidad de ocurrencia de incidente o accidente.

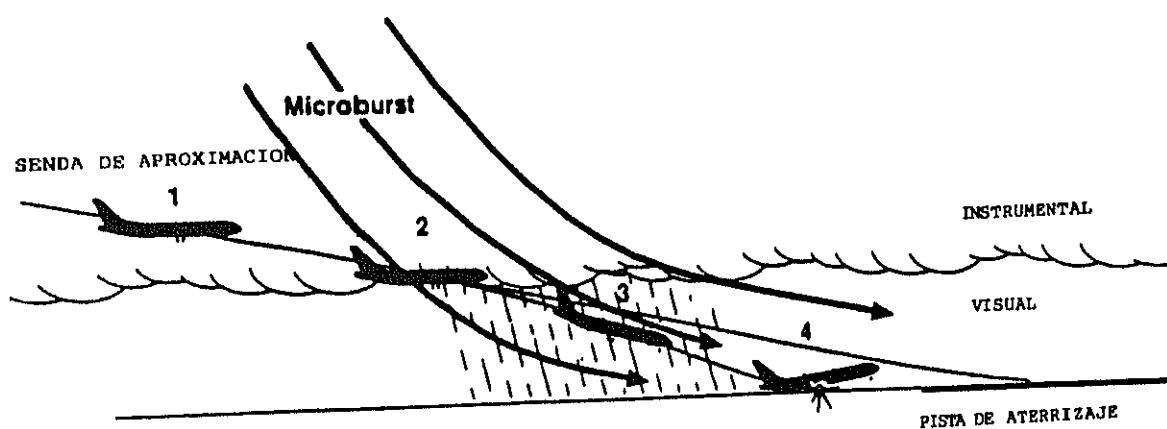


Fig. 5.2 : Efecto de la influencia del Microburst durante el aterrizaje de una aeronave.

Los tiempos de respuesta más usuales ante la acción del Microburst en actuaciones de despegue pueden observarse en la *Figura 5.3*, donde se distingue entre la actuación normal de despegue y la posibilidad de que puede producirse algún tipo de incidente (Iberia L.A.E., 1992). El tiempo que transcurre desde el

despegue hasta que debido a la acción del Microburst puede producirse el accidente es muy reducido, con lo que prácticamente no existe tiempo suficiente para realizar acciones correctoras por parte de la tripulación.

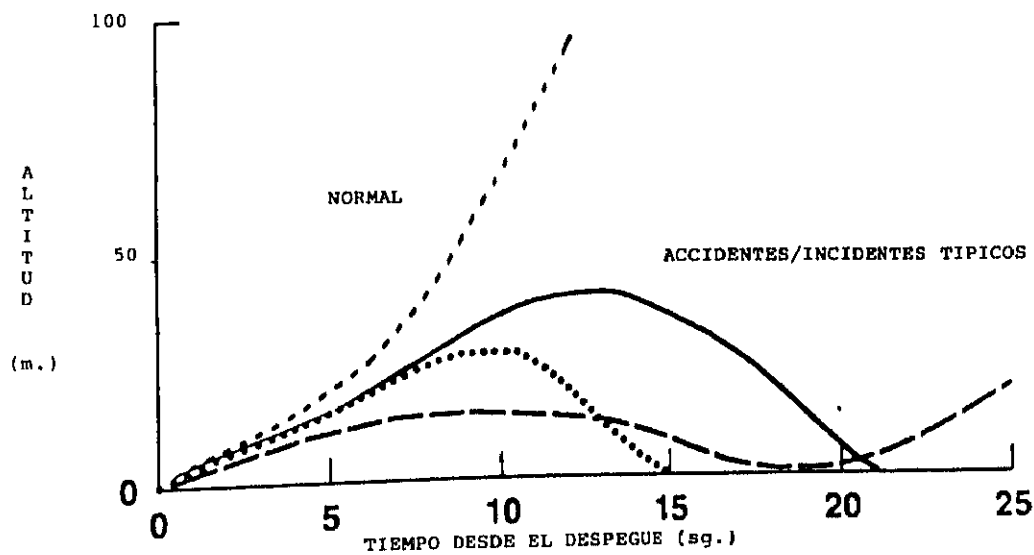


Fig. 5.3 : Tiempo de respuesta estimado en la maniobra de despegue ante la acción del fenómeno Microburst.

5.4.- ECUACIONES QUE DETERMINAN LA TRAYECTORIA DEL AVIÓN

5.4.1.- EJES DE REFERENCIA

El estudio que se va a realizar está encaminado *fundamentalmente*, al análisis de la trayectoria de la aeronave con respecto al terreno. En consecuencia, se utilizan ejes de referencia fijos a la superficie terrestre que se considerarán inerciales, ya que pueden despreciarse los efectos de la rotación de la Tierra debido a que ésta es lo suficientemente lenta respecto al fenómeno que se está estudiando. Como el campo de velocidades del aire creado por el Microburst se ha considerado bidimensional así se procederá también con la simulación del vuelo de la aeronave para mantener la coherencia del experimento.

Se consideran los ejes de referencia siguientes:

- Eje OX situado horizontalmente y con sentido positivo hacia la derecha
- Eje OZ situado según la vertical local y con sentido positivo hacia arriba.
- El origen de este sistema de referencia está situado en la superficie terrestre.

El movimiento de la aeronave está determinado por su desplazamiento con respecto a estos ejes, y del giro de su eje longitudinal alrededor de su centro de gravedad, es decir, del fenómeno de cabeceo, por lo que no se considerarán en este estudio movimientos de alabeo ni guiñada que no son relevantes para los planteamientos propuestos.

5.4.2.- VELOCIDADES DEL AVIÓN

Teniendo en cuenta que el fenómeno en estudio tiene su verdadera importancia en las proximidades de la superficie terrestre, hay que considerar dos aspectos de la velocidad de la aeronave: la velocidad con respecto al aire V_r , necesaria para calcular las fuerzas aerodinámicas, y la velocidad con respecto a ejes fijos a la superficie terrestre V_s , que sirve para calcular la trayectoria del avión. Además, debido a la presencia del viento, la velocidad del avión respecto al suelo no coincide con la velocidad del avión respecto al aire que le rodea, siendo:

$$V_s = V_r + V_v \quad (5.1)$$

donde V_v es la velocidad del aire en ese punto con respecto al suelo.

Las direcciones de las velocidades con los ejes de referencia son:

- γ_r ángulo que forma la dirección de la velocidad del avión respecto al aire, V_r con el eje OX.
- γ_s ángulo que forma la velocidad del avión respecto a ejes fijos a la superficie, V_s con el eje OX.

En la *Figura 5.4* se representan tanto las distintas velocidades como los ángulos más significativos del movimiento.

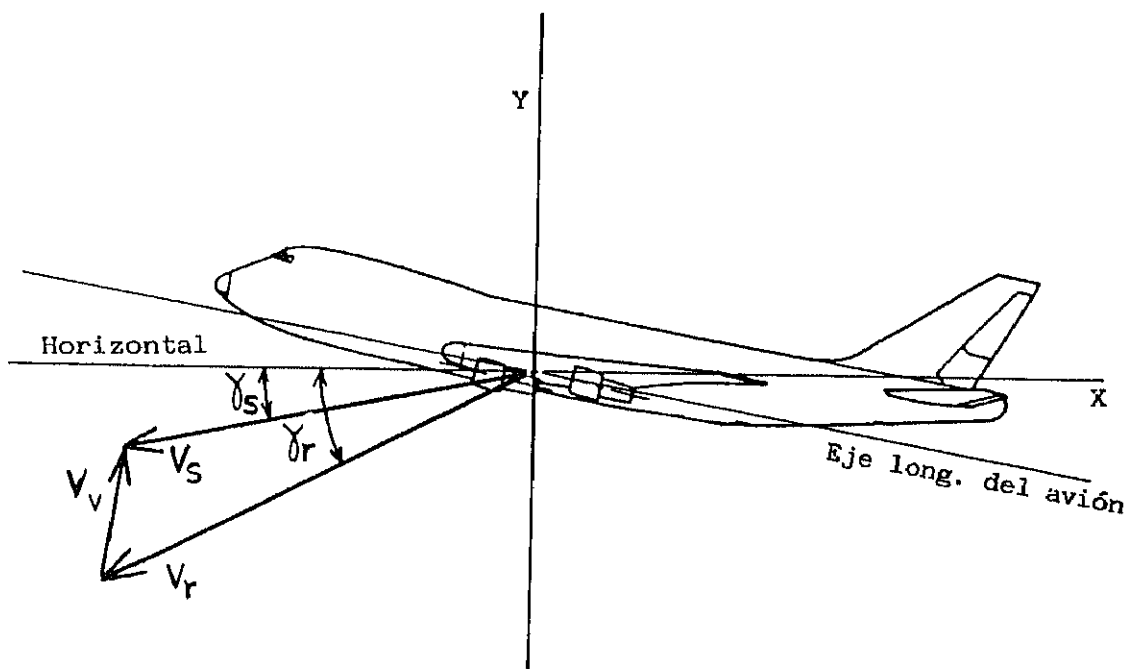


Fig. 5.4 : Velocidades del avión y del aire y ángulos más significativos del movimiento.

5.4.3.- FUERZAS Y MOMENTOS EXTERIORES QUE ACTÚAN SOBRE EL AVIÓN

Básicamente, las fuerzas exteriores que actúan sobre el avión pueden considerarse que son de tres tipos: gravitatorias, aerodinámicas y propulsoras.

a) Fuerzas gravitatorias (W)

Para el estudio realizado se considera que la masa del avión permanece constante durante toda la simulación, ya que teniendo en cuenta la breve duración de tiempo que abarca este proceso como se ha indicado anteriormente, no se produce un consumo de combustible tal que haya que tenerlo en cuenta a la hora de evaluar el peso del avión. Por tanto el peso del avión se mantiene con un módulo de valor constante y dirigido hacia abajo según la vertical local, que es la dirección del eje OZ .

b) Fuerzas aerodinámicas (F_A)

La resultante de las fuerzas aerodinámicas tiene una componente en la dirección de la velocidad incidente del aire, la resistencia aerodinámica D , y otra componente en la dirección perpendicular de la velocidad, la sustentación aerodinámica L , viniendo ambas fuerzas expresadas por las siguientes relaciones:

$$D = q S C_D \quad (5.2)$$

$$L = q S C_L \quad (5.3)$$

donde q es la presión dinámica de la corriente:

$$q = \frac{1}{2} \rho v^2 \quad (5.4)$$

y S una superficie de referencia que corresponde a la superficie alar. Los coeficientes adimensionales de sustentación C_L y de resistencia C_D dependen del ángulo de ataque, α , formado entre la dirección de la velocidad del viento y el eje longitudinal del avión.

c) Fuerzas propulsoras (E)

El empuje proporcionado por la planta propulsora actúa en la dirección del eje longitudinal del elemento motriz. Por lo tanto la dirección de esta fuerza en los ejes de referencia viene determinada por la posición angular del eje longitudinal del avión con respecto a la horizontal, θ , y por el ángulo formado por el eje de los motores respecto al eje longitudinal del avión, i_T .

El conjunto de las fuerzas reseñadas se consideran aplicadas en el centro de gravedad del avión con lo que la fuerza total resultante que actúa sobre la aeronave es:

$$\mathbf{R} = \mathbf{W} + \mathbf{F}_A + \mathbf{E} \quad (5.5)$$

que descompuesta según los ejes de referencia permite obtener dos ecuaciones escalares:

$$R_x = D \cos\gamma_r - L \sin\gamma_r - E \cos(\theta + i_T) \quad (5.6)$$

$$R_y = D \sin\gamma_r + L \cos\gamma_r + E \sin(\theta + i_T) - W \quad (5.7)$$

Para la determinación de los momentos que actúan sobre el avión, se considera el momento creado por las fuerzas aerodinámicas y el momento creado por las fuerzas propulsoras:

$$M = M_A + M_E \quad (5.8)$$

siendo

$$M_A = q c S C_M \quad (5.9)$$

donde, c , es la cuerda media aerodinámica del ala, definida como la cuerda que tendría un ala rectangular que produjera la misma sustentación y momento y C_M el coeficiente de momento de cabeceo del avión respecto al eje OZ que es función del ángulo de ataque.

En la *Figura 5.5* se representan las fuerzas y momentos que actúan sobre el avión y los ángulos reseñados.

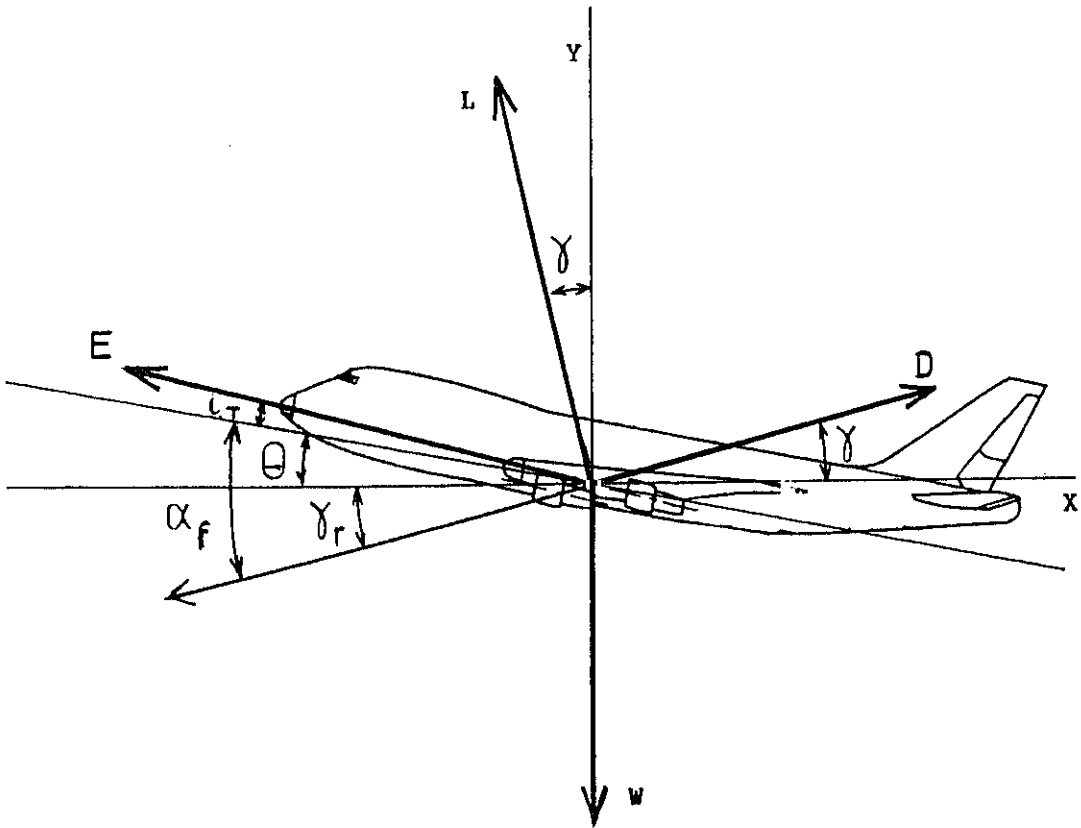


Fig. 5.5 : Esquema representativo de las fuerzas que actúan sobre el avión con los ángulos más significativos del movimiento.

5.4.4.- CALCULO DE LA TRAYECTORIA

Para la determinación de la trayectoria del avión, considerado como un sólido rígido, utilizaremos las ecuaciones que plantean la conservación del momento lineal y angular en ejes inerciales, con lo que se tiene:

$$\frac{dV_s}{dt} = \frac{W + F_A + E}{m} \quad (5.10)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{M_A + M_G}{m} \quad (5.11)$$

Para conocer la posición del avión en cualquier instante deben integrarse estas expresiones respecto al tiempo. Sin embargo, puesto que tanto las fuerzas como los momentos aerodinámicos son a su vez funciones de la posición y de la velocidad, no es factible realizarlo analíticamente, con lo que hay que recurrir a realizar una integración numérica que proporcionará datos sobre la posición y la velocidad en un número discreto de instantes. Considerando que los intervalos de tiempo que separan estos instantes son muy pequeños se puede considerar que:

$$\begin{aligned} \frac{dV_s}{dt} &\approx cte \\ \frac{d\omega}{dt} &\approx cte \end{aligned} \quad (5.12)$$

En consecuencia, las variaciones de las velocidades lineal V_s y angular ω , en un determinado intervalo de tiempo, pueden expresarse de la siguiente forma:

$$\frac{d\mathbf{v}_s}{dt} = \frac{\Delta \mathbf{v}_s}{h} = \frac{\mathbf{v}_{s \text{ final}} - \mathbf{v}_{s \text{ inicial}}}{h} \quad (5.13)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{\Delta \omega}{h} = \frac{\omega_{\text{final}} - \omega_{\text{inicial}}}{h} \quad (5.14)$$

Con estas relaciones se pueden calcular las velocidades lineal y angular en un cierto instante, conocidos los valores de dichas magnitudes en el instante anterior y las fuerzas que actúan sobre la aeronave, además de la duración del intervalo o paso de integración h :

$$\mathbf{v}_{s \text{ final}} = \mathbf{v}_{s \text{ inicial}} + \frac{d\mathbf{v}_s}{dt} h \quad (5.15)$$

$$\omega_{\text{final}} = \omega_{\text{inicial}} + \frac{d\omega}{dt} h \quad (5.16)$$

Suponiendo que el avión lleva un movimiento uniformemente acelerado, tanto lineal como angularmente, la posición lineal s , y la posición angular θ , que se denomina *actitud*, viene dadas al final de cada intervalo por:

$$s_{\text{final}} = s_{\text{inicial}} + \mathbf{v}_{s \text{ inicial}} h + \frac{1}{2} \frac{d\mathbf{v}_s}{dt} h^2 \quad (5.17)$$

$$\theta_{\text{final}} = \theta_{\text{inicial}} + \omega_{\text{inicial}} h + \frac{1}{2} \frac{d\omega}{dt} h^2 \quad (5.18)$$

La situación al final de un intervalo sirve como punto inicial del intervalo siguiente. Las derivadas de la velocidad lineal y angular se vuelven a determinar al inicio de cada paso, una vez recalculadas las fuerzas y momentos que actúan sobre el avión. Por tanto, el resultado obtenido es una sucesión cronológica de

posiciones, ángulos y velocidades que permiten estudiar el movimiento del avión a lo largo del tiempo.

5.5.- SIMULACIÓN DEL MOVIMIENTO DEL AVIÓN EN EL INTERIOR DEL MICROBURST

5.5.1.- CONDICIONES INICIALES DEL AVIÓN EN LA SIMULACIÓN

Previamente a la realización del proceso de simulación es necesario estimar la posición, actitud, velocidad y empuje de la planta propulsora de la aeronave en el instante inicial.

a) Posición y actitud.

El objetivo de este estudio es analizar el comportamiento del avión durante su aproximación al aeropuerto, en los últimos 4.000 metros previos al inicio del umbral o cabecera de la pista correspondiente a la primera fase del aterrizaje. Este valor se ajusta a las dimensiones del dominio atmosférico considerado en el desarrollo del Microburst modelizado anteriormente. A esta distancia el avión debe haber interceptado la senda de planeo del ILS (Instrument Landing System) con un ángulo de descenso de $\gamma = 3^\circ \pm 0,5^\circ$, establecido por las normas de aeronavegabilidad, correspondiente a las condiciones teóricas ideales en las que el avión debe descender con velocidad y *actitud* constante.

Para la ejecución de la simulación, se supone que el inicio de la cabecera de la pista de aterrizaje está situada en el borde izquierdo del dominio atmosférico en el que se produce el Microburst. En cumplimiento de las normas FAR (Federal Aviation Regulation), el avión al llegar a la vertical del umbral de pista, debe estar como mínimo a 15 metros de altura sobre el terreno para iniciar la segunda fase del aterrizaje. En estas condiciones, y considerando que el avión ha debido seguir la senda de planeo indicada

por el ILS, deberá encontrarse a 225 metros de altura sobre el terreno cuando penetra en la zona de influencia del Microburst.

La actitud θ , que es el ángulo formado por el eje longitudinal del avión respecto a la horizontal, debe cumplir:

$$\theta = \alpha - \gamma \quad (5.19)$$

b) Velocidad y empuje de la planta propulsora.

El descenso teórico del avión se realiza con factor de carga unidad, lo que equivale a decir que se efectúa a velocidad constante, siendo nula la suma de las fuerzas exteriores que actúan sobre el avión. Las ecuaciones (5.6) y (5.7) estudiadas anteriormente quedan en la forma:

$$D \cos \gamma_r - L \operatorname{sen} \gamma_r - E \cos (\theta + i_T) = 0 \quad (5.20)$$

$$D \operatorname{sen} \gamma_r + L \cos \gamma_r + E \cos (\theta + i_T) - W = 0 \quad (5.21)$$

donde la sustentación y resistencia aerodinámica son:

$$L = \frac{1}{2} \rho V^2 S C_L \quad (5.22)$$

$$D = \frac{1}{2} \rho V^2 S C_D \quad (5.23)$$

Este sistema de ecuaciones permite determinar tanto la velocidad de descenso como el empuje proporcionado por la planta propulsora en las condiciones de la experiencia. Evidentemente, debido al efecto del Microburst la velocidad de descenso irá variando puesto que las fuerzas aerodinámicas que actúan sobre el avión son modificadas por la acción del

Microburst.

5.5.2.- PÉRDIDA AERODINÁMICA

La fuerte cizalladura provocada por el Microburst puede llegar a hacer que se produzca la pérdida aerodinámica, por lo que es necesario determinar el ángulo de ataque correspondiente al coeficiente de sustentación máximo o lo que es igual el ángulo de ataque para el cual el avión entra en pérdida. Para ello debe compararse en cada instante el valor que toma el ángulo de ataque α , genérico, con el valor del ángulo de ataque correspondiente a la pérdida $\alpha_{\text{máx}}$. Este valor $\alpha_{\text{máx}}$ se determina en función de las condiciones indicadas en la norma FAR 23, que establece que durante la primera fase de aproximación al aterrizaje la velocidad del avión debe verificar que:

$$V_g \leq 1.3 V_{\text{pérdida}}$$

El valor del ángulo de ataque que corresponde a esta velocidad se determina imponiendo la igualdad de la sustentación aerodinámica L y el peso w , cuando la aeronave sigue la trayectoria correspondiente.

5.5.3.- SIMULACIÓN MICROBURST - AVIÓN

Se inicia el proceso de la simulación del un Microburst actuando sobre una aeronave que entra en su zona de influencia, conociendo en determinado instante inicial la posición, actitud, velocidad de traslación respecto al suelo y velocidad angular de cabeceo del avión. Partiendo de los datos conocidos en ese instante del desarrollo del Microburst, de la velocidad y densidad del aire en la atmósfera considerada, se determina mediante interpolación lineal entre los puntos más cercanos al avión de los que se disponga información, la velocidad del avión respecto al aire, componiendo los vectores velocidad del avión con respecto al suelo y la velocidad del aire en ese punto. Con esta velocidad y la actitud del avión se calcula el ángulo de ataque del avión, que se utiliza para determinar los coeficientes aerodinámicos, los cuales conjuntamente con la velocidad y el valor de la densidad en el punto considerado, permiten obtener las fuerzas y el momento aerodinámico que actúan en ese instante sobre el avión. La suma vectorial de las fuerzas aerodinámicas, el peso y el empuje de la planta propulsora, determinan la fuerza total que actúa sobre el avión, y que conjuntamente con el momento de cabeceo permite obtener las aceleraciones de traslación y angular del avión. Este proceso, iterativo que sirve para calcular la posición del avión, se realiza en intervalos de tiempo lo suficientemente pequeños para poder considerar que las aceleraciones son aproximadamente constantes durante el siguiente intervalo. El cálculo de la posición, actitud, velocidad de traslación respecto al suelo y velocidad angular al final de cada período, se obtienen mediante la aplicación de las ecuaciones de la cinemática correspondientes a un movimiento uniformemente acelerado. En el supuesto que el ángulo de ataque del avión superase el valor del ángulo de pérdida o la

trayectoria llegase al suelo se detiene el proceso.

En el diagrama de flujo de la *Figura 5.6* se indica el proceso de desarrollo de la trayectoria de la aeronave en su fase de aproximación al suelo, teniendo en cuenta la influencia que el Microburst considerado ejerce sobre el movimiento del avión. Se toman intervalos de tiempo muy pequeños, de 0,1 segundos, para poder considerar que el avión se mueve lentamente, y en consecuencia las aceleraciones son aproximadamente constantes durante el siguiente intervalo de integración.

Para la aplicación de la simulación a un caso práctico se ha considerado el avión Boeing 747, ya que se dispone de suficiente información en cuanto al comportamiento de la aeronave en su aproximación al aeropuerto en configuración de aterrizaje con flaps deflectados. Se ha determinado la posición del avión en función del tiempo, en el descenso teórico o ideal sin estar sometido a ninguna perturbación, y también en la trayectoria real que sigue debido al efecto del Microburst, calculándose la diferencia de alturas en cada instante. La simulación se inicia estando el avión a una distancia de 4.000 m de la cabecera de pista y a 225 m de altura sobre el terreno, descendiendo con un ángulo de $3^\circ \pm 0.5^\circ$ según las normas de aeronavegabilidad.

En la *Figura 5.7* se muestra gráficamente el Microburst desarrollado en el momento de su máxima intensidad (correspondiente al instante 400 s analizado en el capítulo anterior), así como la trayectoria teórica de descenso del avión y la trayectoria obtenida en la simulación. Se observa, que la aeronave para las condiciones del caso en estudio contacta con el suelo estando aún a una

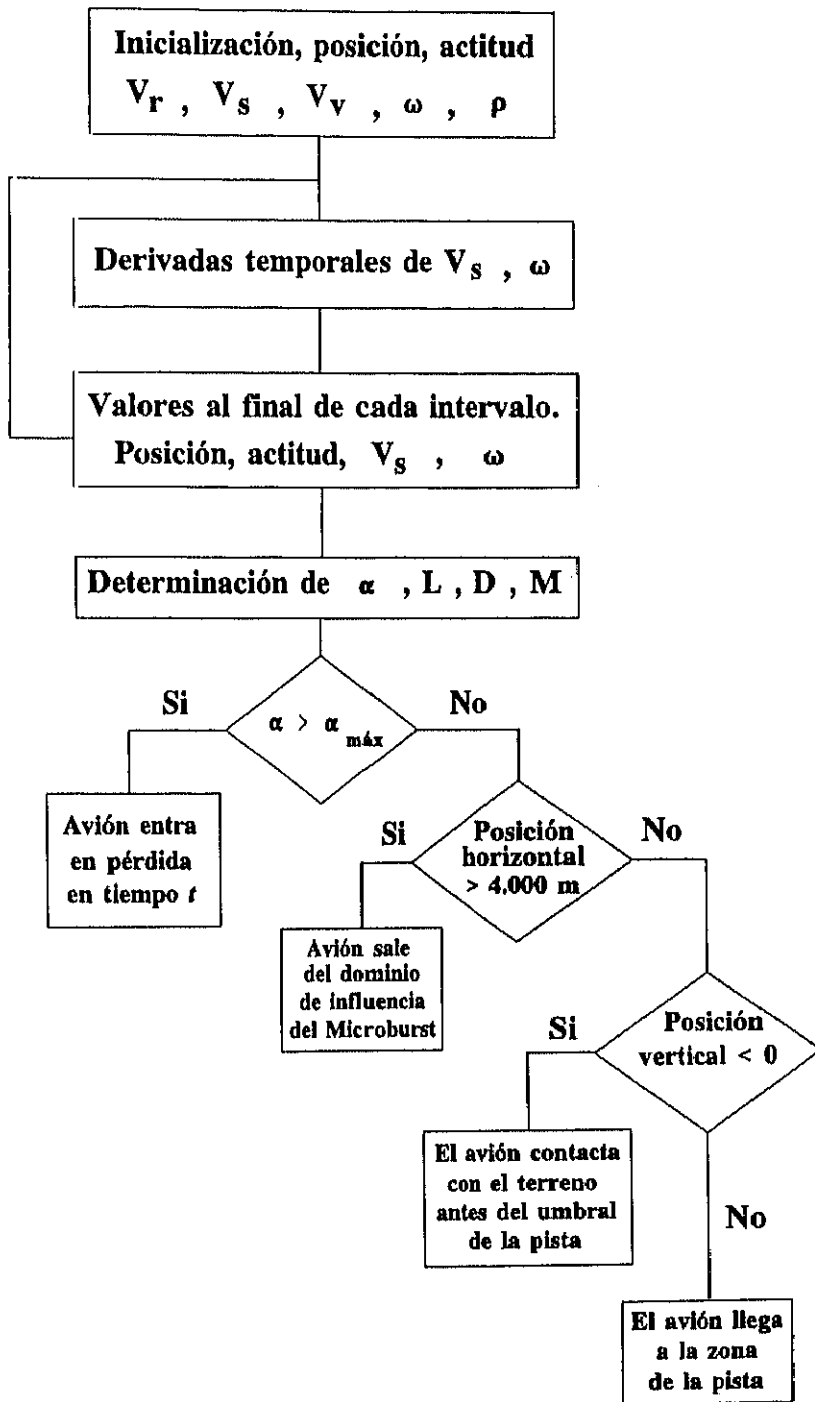
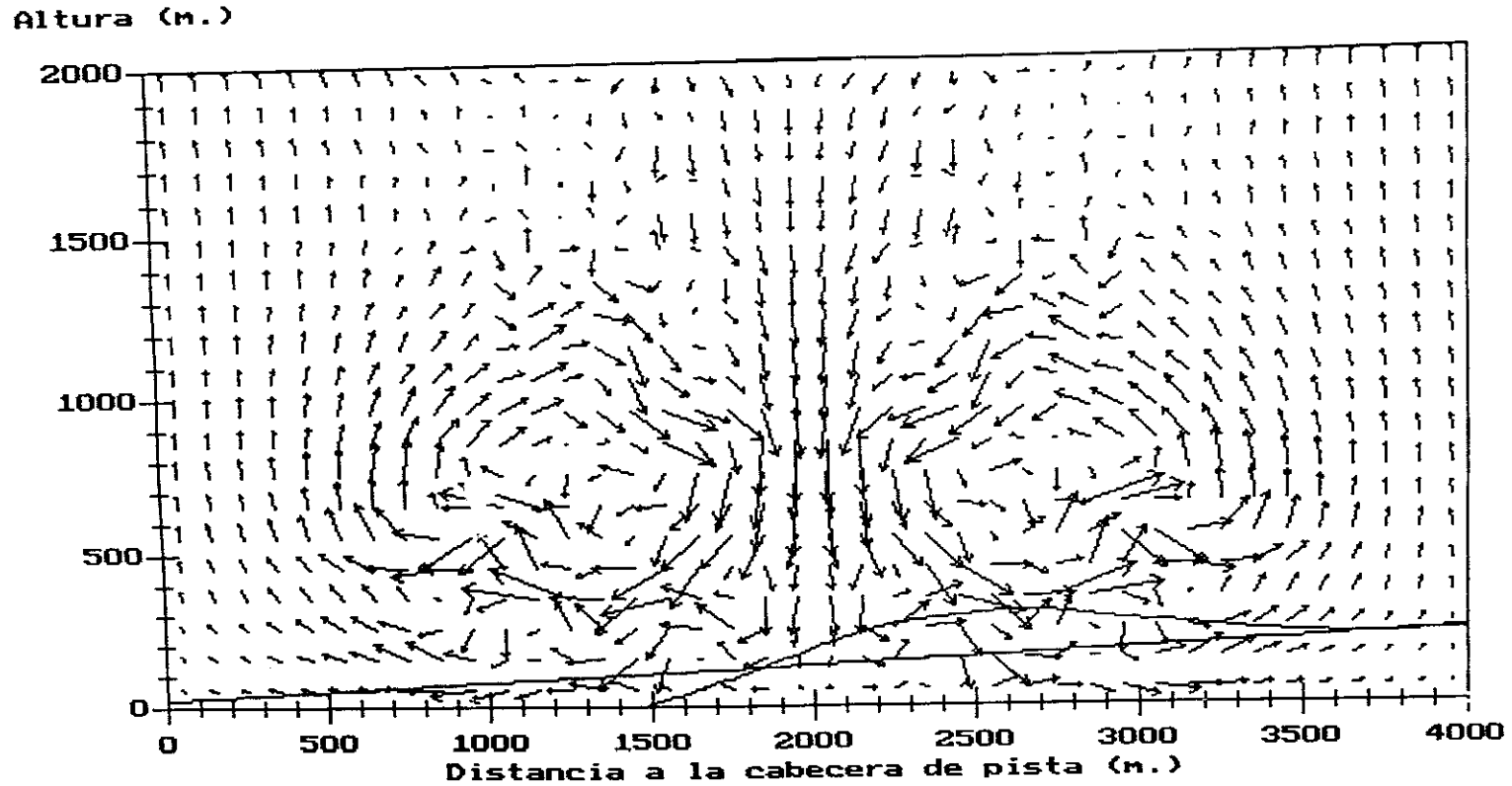


Fig.5.6 : Diagrama de flujo de la trayectoria de la aeronave en su fase de aproximación bajo la influencia del Microburst.



Contacto con la superficie del terreno a una distancia de 1.451 m de la cabecera de pista.

ESCALA
→
5 m/s

Fig. 5.7 :Representación gráfica de la trayectoria teórica de descenso del avión y de la trayectoria obtenida en la simulación, durante el desarrollo del Micro - burst en el momento de su máxima intensidad.

distancia de 1.451 m de la cabecera o umbral de la pista. Durante los primeros 2.180 m de la simulación, el avión se desvía por encima de la trayectoria teórica, pero en los siguientes 369 m se posiciona por debajo de dicha trayectoria, descendiendo muy rápidamente hasta que contacta con el suelo. Inicialmente el avión desciende con un ángulo menor que el teórico, debido a que al recibir viento de cara, la velocidad con respecto al aire y por lo tanto, la sustentación, aumentan, aunque la velocidad horizontal con respecto al suelo disminuye. Esta disminución de la velocidad horizontal con respecto al suelo, se debe a que el viento de cara también aumenta la resistencia aerodinámica, produciendo un efecto de frenado de la aeronave. Los últimos 500 m antes de llegar al centro del Microburst, el avión incluso aumenta su altura con respecto al suelo tomando una trayectoria ascendente. En el centro del flujo descendente, el viento incide sobre la aeronave desde arriba haciendo disminuir el ángulo de ataque y la sustentación. Después de atravesar el centro del Microburst, el avión se mueve en la misma dirección que el viento, con lo que su velocidad con respecto al aire queda muy disminuida. Esta disminución es mayor que el aumento experimentado antes de llegar al centro del Microburst, ya que, debido al efecto de frenado que sufre el avión en su aproximación al fenómeno descendente, la velocidad respecto al suelo es menor que la que tenía al iniciar el descenso. En consecuencia, la disminución de sustentación es ahora muy importante y el avión desciende a un régimen mayor del previsto, contactando con el suelo en cuestión de pocos segundos, tiempo insuficiente para que el piloto pueda reaccionar adecuadamente.

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES

6.1.- CONCLUSIONES

Todo fenómeno tormentoso tiene gran probabilidad de producir turbulencias descendentes que al llegar cerca de la superficie del terreno generan inestabilidades atmosféricas. El Microburst es la más peligrosa de las ráfagas verticales descendentes debido a que provoca una cizalladura del viento muy intensa con gran variabilidad de la velocidad del viento en bajos niveles de altitud. Además, puesto que es un fenómeno que alcanza su mayor velocidad en las proximidades del terreno, se hace muy difícil su detección en altura antes de que los efectos se dejen notar a nivel del suelo. Por otro lado, como desarrolla su influencia en un área muy localizada, el tamaño de la zona afectada por los fuertes vientos se circunscribe a radios de acción del orden de los tres mil a cuatro mil metros, con lo que su presencia puede pasar inadvertida incluso para sensores anemométricos instalados en la superficie. No existen métodos fiables para predecir la ocurrencia del Microburst, puesto que no se ha logrado determinar con exactitud cuáles son las condiciones atmosféricas que determinan el desencadenamiento del mismo, ya que sabiendo que puede producirse en cualquier condición meteorológica convectiva, y se ha observado que la mayor parte de las tormentas producen este fenómeno, también se ha podido detectar Microburst en zonas de clima muy seco donde no se había identificado ninguna tormenta.

La influencia de las turbulencias descendentes a baja altura tiene gran importancia en la seguridad del tráfico aéreo, particularmente en las operaciones cercanas al suelo tales como el aterrizaje y el despegue, siendo significativo el hecho de que los accidentes ocurridos a aeronaves en fase de aproximación son

del orden de dos veces y media el número de los ocurridos a aeronaves en fase de despegue.

De los estudios realizados a lo largo de este trabajo se van a derivar una serie de conclusiones que contemplarán dos aspectos. Uno de ellos el relativo a la simulación propiamente dicha del fenómeno Microburst, analizando la modelización dinámica del mismo y la influencia de los distintos factores que intervienen en su formación, desarrollo y desaparición. El segundo aspecto está referido a los efectos que las turbulencias descendentes a baja altura ejercen sobre las aeronaves en la fase de aproximación al aterrizaje y las consecuencias que de ello se derivan. Como consecuencia de las circunstancias antes expresadas se ha desarrollado esta memoria cuyos aspectos más importantes podrían resumirse en los siguientes puntos.

1.- Se ha realizado un profundo análisis de la bibliografía para hacer una recopilación o síntesis de la información disponible sobre el tema en estudio. Esto ha permitido dar una idea global del fenómeno, sintetizando y aunando parte de las observaciones y teorías que aparecen dispersas desde el inicio de estas investigaciones, que comenzaron a fraguarse en los finales de la década de los años setenta.

2.- A partir de los estudios previos se ha desarrollado un modelo físico bidimensional que permite simular la génesis y evolución, hasta su máxima intensidad, del fenómeno Microburst. Partiendo de las ecuaciones generales del movimiento, e imponiendo las condiciones iniciales y de contorno idóneas, se ha procedido al estudio del desarrollo del fenómeno

a partir de este modelo físico.

3.- Se ha resuelto, utilizando métodos numéricos, dicho modelo físico con el algoritmo apropiado para el análisis del fenómeno, en un dominio espacial de 2.000x2.000 m considerando un tamaño del mallado de 100x100 m.

4.- Se ha procedido a realizar un estudio de la sensibilidad del modelo a las variaciones de los distintos parámetros que definen con mayor relevancia el comportamiento del fenómeno Microburst. Se ha constatado concluyentemente que el enfriamiento en el núcleo de la descendencia, que parametriza la intensidad de precipitación en la corriente descendente, es el elemento que determina fundamentalmente la magnitud de la intensidad del Microburst.

5.- Una vez analizada la información obtenida de los experimentos que se han realizado en la simulación del fenómeno Microburst, se deduce la siguiente serie de aspectos relevantes.

i) Durante la fase de desarrollo del Microburst, (para tiempos superiores a 200 s), se produce convergencia en la parte superior de la zona de enfriamiento y divergencia por debajo de ella, pero una vez se ha desarrollado completamente alcanzando las velocidades máximas, la estructura del Microburst se descompone.

ii) En el desarrollo del Microburst a lo largo del tiempo, y hasta

alcanzar la máxima intensidad, se observa un proceso de horizontalización del *outflow*, pasando de una situación en los momentos iniciales en la que el eje del *outflow* es vertical, a otra, cuando el Microburst está en su máxima intensidad, en la que el eje del *outflow* adopta prácticamente una posición horizontal.

iii) Asimismo se produce una expansión del *outflow* en sentido perpendicular al eje de la descendencia, alcanzando la zona de influencia valores que van desde los 2.200 m a los 200 s desde el inicio del fenómeno, a los 3.800 m cuando el Microburst alcanza su máxima intensidad a los 400 s aproximadamente. En concordancia con ello, la diferencia incremental de la máxima velocidad del flujo a ambos lados del eje del Microburst, varía desde 7 m s^{-1} en puntos del dominio separados 1.100 m, hasta 36 m s^{-1} en puntos separados 1.600 m entre sí.

iv) Cuando la corriente descendente a adquirido suficiente intensidad y alcanza la superficie del terreno, se produce una zona de estancamiento debajo del centro de la descendencia, generándose un gradiente de presión desde abajo que hace que la corriente aumente de anchura y desarrolle vorticidad. En las proximidades de la zona de estancamiento aparecen oscilaciones en la corriente, que horizontalizan el desarrollo del flujo por debajo de la zona del *outflow*.

v) El tiempo durante el cual el Microburst se desarrolla hasta su

máxima intensidad, y que es del orden de 400 s , es acorde con los tiempos medidos en las diferentes observaciones realizadas. Asimismo en su conjunto, los valores obtenidos durante la simulación están razonablemente de acuerdo con los datos de las observaciones que han podido ser contrastados, teniendo en cuenta la escasez relativa de mediciones sobre el fenómeno del Microburst así como la variabilidad de las mismas. El modelo describe adecuadamente el fenómeno físico, en concordancia con las observaciones realizadas, tanto cualitativa como cuantitativamente.

6.- Se ha realizado una aplicación del modelo físico, en relación con los efectos que el Microburst ejerce sobre una aeronave en fase de aproximación al aterrizaje, deduciéndose los siguientes aspectos.

i) La mayor peligrosidad del fenómeno, radica en el efecto combinado de vientos iniciales de cara y posteriores de cola a que está sometido el avión al atravesar un Microburst. Inicialmente los vientos de cara lo hacen perder velocidad con respecto al suelo y elevarse sobre la trayectoria teórica. Posteriormente el efecto de los vientos de cola hacen que el avión tenga menor velocidad respecto al suelo que antes de penetrar en el Microburst, el régimen de descenso aumenta mucho y deja pocos segundos para la corrección.

ii) El tiempo que transcurre desde que el avión comienza descender a mayor régimen del previsto, hasta el impacto contra el suelo es

cuestión de pocos segundos, que en general es insuficiente para que el piloto reaccione y los motores se activen al empuje máximo.

NOTA:

*De lo expuesto anteriormente, se puede indicar como resultado del modelo estudiado (y aunque no ha sido el objeto de esta tesis) que en una situación en la que una aeronave en fase de aproximación al aterrizaje, es afectada por el fenómeno Microburst, la acción a realizar por el piloto es aumentar empuje y ganar altura, reintentando el aterrizaje en un momento posterior cuando el Microburst se haya disipado. Hay que tener en cuenta, que el tiempo que transcurre desde que el avión comienza a **descender a mayor régimen del previsto, hasta el impacto contra el suelo es cuestión de pocos segundos, tiempo en todo caso insuficiente para que por parte del piloto se realicen las acciones correctoras oportunas. Se pueden presentar Microburst cuya intensidad es tal que una vez en su interior no es factible escapar de sus efectos.***

CAPÍTULO 7

BIBLIOGRAFÍA

BIBLIOGRAFÍA

Atkins, N.T. and R.M. Wakimoto, 1991: Wet Microburst activity over the southerastern United States. Implications for forecasting. *Weather and Forecasting*, **6**, 470 - 482.

Atkinson, B.W. 1981: *Mesoscale Atmospheric Circulations*. Academy Press, 495 pp.

Barnard, R.H. and D.R. Philpott, 1989: *Aircraft flight*. Ed. Longman Scientific & Technical, 371 pp.

Bedard, A.J. and T.J. LeFebvre, 1986: Surface measurements of guts fronts and Microburst during the JAWS project. Statistical results and implications for wind shear detection, prediction, and modeling. *NOAA Tech. Memo. ERL WPL-135, Wave Propagation Laboratory*, 112 pp.

Bradshaw, P. and E.M. Love, 1959: The normal impingement of a circular air jet on a flat surface. *ARC R and M 3205*, Sept. 1959.

Byers, H.R. and R.R. Braham, 1949: the Thunderstorm. *U.S. Govt. Printing Office, Washington, D.C.*, 287 pp.

Canet, J.M., G. Bugeda and E. Oñate, 1991: Simulación numérica en la aerodinámica de vehículos. *Centro internacional de métodos numéricos en Ingeniería*, 360 pp.

Caplan, S.J., A.J. Jr. Bedard and M.T. Decker, 1990: The 700-500 mb lapse rate as an index of Microburst probability. An application for thermodynamic profilers. *Journal of Applied Meteorology*, **29**, 680-687.

Carmona, I. 1987: *Aerodinámica y actuaciones del avión*. Ed. Paraninfo. Madrid, 448 pp.

Chuang, S., F.H. Proctor, J.W. Zack and M.L. Kaplan, 1984: A numerical weather prediction system designed to simulate atmospheric downburst phenomena. *AIAA 22nd Aerospace Sciences Meeting, AIAA - 84 - 0352 - Reno*, 15 pp.

Ellrond, G. 1989: Environmental conditions associated with the Dallas Microburst storm determined from satellite soundings. *Weather and Forecasting*, **4**, 459 - 484.

Etkin, B., 1982: *Dynamics of flight. Stability and control*. Ed. John Wiley. New York, 370 pp.

Federal Aviation Administration, 1989: Siting guidelines for the Low-Level Wind Shear Alert System (LLWAS) remote facilities. *Order 6560. 21A, U.S. Dept. Transportation. (FAA), Washington, DC*.

Font, I., 1983: *Climatología de España y Portugal*. Publicaciones del Instituto Nacional de Meteorología. Madrid, 296 pp.

Fujita, T.T., 1985: The downburst. *Dept. of Geophysical Science. University of Chicago, SMRP. Rep. 210*, 122 pp.

Fujita, T.T. and F. Caracena, 1977: An analysis of three weather related aircraft accidents. *Bulletin American Meteorology Society*, **58**, 1164 - 1181.

Fujita, T.T. and R.M. Wakimoto, 1981: Five scales of airflow associated with a series of downburst on 16 July 1980. *Monthly Weather Review*, **109**, 1438 - 1456.

Fujita, T.T. and R.M. Wakimoto, 1983: JAWS Microburst revealed by tripple - Doppler radar, aircraft, and PAM data. *Preprints 13th Conf. on Severe Local Storms, Tulsa, American Meteorology Society*, 97 - 100.

Hjelmfelt, M.R., 1987: The Microburst of 22 June 1982 in JAWS. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **44**, 1646 - 1665.

Hjelmfelt, M.R., 1988: Structure and life cycle of Microburst outflows observed in Colorado. *Journal of Applied Meteorology*, **27**, 900 - 927.

Hjelmfelt, M.R. and R.D. Roberts, 1985: Microburst lines. *Preprints 14th Conference Severe Local Storms. American Meteorology Society*. 297 - 300.

Iberia, L.A.E., 1990: Sistema de detección y guiado de condiciones de cizalladura de viento. *Dir. Gen. de Desarrollo Técnico*, 7 pp.

Iberia, L.A.E., 1992: Guía de Windshear para pilotos. *Dirección Técnica de vuelo*, 46 pp.

Johnston, B.C., 1986: Windshear detection: A report of the first such airborne warning device to the commercially certified. *Int. Civil Aviat. Organ. Bull. March*, 14 pp.

Kermode, A.C., 1987: *Mechanics of flight*. Ed. Longman Harlow, Essex, 470 pp.

Kessinger, C.J., M.R. Hjelmfelt and J. Wilson, 1983: Low level Microburst wind structure using Doppler radar and PAM data. *Preprints 21st Conf. Radar Meteorology. American Meteorology Society*, 609 - 615.

Kessinger, C.J., D.B. Parsons and J.W. Wilson, 1988: Observations of a storm containing Misocyclones, Downburst, and horizontal vortex circulations. *Monthly Weather Review*, **116**, 1959 - 1982.

Kessler, E., 1990: Low-Level Wind Shear Alert Systems and Doppler radar in the aircraft terminal operations. *Journal Aircraft*, **27**, 423 - 428.

Kemp, J.B. and R. Rotunno, 1983: A study of the tornadic region within a supercell thunderstorm. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **40**, 359 - 377.

Knupp, K.R., 1988: Downdrafts within high plains cumulonimbi. Part II: Dynamics and thermodynamics. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **45**, 3965 - 3982.

Krueger, S.K. and R.M. Wakimoto, 1984: Numerical simulation of dry Microburst. *Preprints 23rd Conf. on Radar Meteorology, Snowmass. American Meteorology Society*, 163 - 166.

Lin, Y., 1988: The subcloud layer eddy kinetic energy budget of a Microburst producing thunderstorm determined from JAWS Dual-Doppler measurements. *Boundary Layer Meteorology*, 44, 349 - 357.

Lin, Y., R.G. Hughes and R.W. Pasken, 1987: Subcloud layer kinematic and dynamic structures of a Microburst producing thunderstorm in Colorado determined from JAWS Dual - Doppler measurements. *Boundary Layer Meteorology*, 39, 67 - 86.

Lin, Y. and P.M. Condray, 1988: Momentum flux in the subcloud layer of a Microburst producing thunderstorm determined from JAWS Dual-Doppler data. *Boundary Layer Meteorology*, 43, 125 - 141.

Lin, Y. and J.A. Coover, 1988: A kinetic energy analysis of a Microburst producing thunderstorm based on JAWS Dual - Doppler data. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 45, 2764 - 2771.

Lin, Y. and J.A. Coover, 1990: Momentum and eddy kinetic energy transports by a multiple Microburst producing storm. *Journal of Geophysical Research*, 95, 7625 - 7636.

Lusk, C.M., T.R. Steward, K.R. Hammond and R.J. Potts, 1990: Judgement and

decision making in dynamic tasks. The case of forecasting the Microburst. *Weather and Forecasting*, **5**, 627 - 639.

Mahoney, W.P. and K.L. Elmore, 1991: The evolution and fine scale structure of a Microburst producing cell. *Monthly Weather Review*, **199**, 176 - 192.

Martin, C. 1990: Detección de windshear. *Avion revue*, **101**, 42 - 46.

Matsuo, T. and Y. Sasyo, 1981: Relationship between types of precipitation on the ground and surface meteorological elements. *Journal Meteorology Society Japan*, **59**, 462 - 426.

Mc Carthy, J. and J. Wilson, 1985: The classify, locate and avoid windshear (CLAWS) project at Denver's Stapleton International Airport. Operational testing of terminal weather hazard warnings with an emphasis on Microburst windshear. *Preprints 2nd Int. Conf. Aviation Weather System, Montreal, American Meteorology Society*, 247 - 256.

Mc Nulty, R.P., 1991: Downburst from innocuous clouds. As example. *Weather and Forecasting*, **6**, 148 - 154.

Moran, J., 1984: *An introduction to theoretical and computational aerodynamics*. Ed. John Wiley and Sons. New York, 464 pp.

Mueller, C.K. and P.H. Hildebrand, 1983: The structure of a Microburst. As observed by ground-based and airborne Doppler radar. *Preprints 21st Radar*

Meteorology Conference. American Meteorology Society, 602 - 608.

Oran, E.S. and J.P. Boris, 1987: *Numerical simulation of reactive flow.* Naval research laboratory. Washington D.C., 825 pp.

Parsons, D.B. and R.A. Kropfli, 1990: Dynamics and fine structure of a Microburst. *Journal of the Atmospheric Sciences, 47, 1674 - 1692.*

Pennell, W.T. and M.A. Lemone, 1974: An experimental study of turbulence structure in the fair weather trade wind boundary layer. *Journal of the Atmospheric Sciences, 31, 1308 - 1323.*

Proctor, F. H., 1985: Numerical simulation of precipitation induced downburst. *Preprints 2nd Int. Conf. Aviation Weather System, Montreal, American Meteorology Society, 257 - 264.*

Proctor, F.H., 1988: Numerical simulations of an isolated Microburst. Part I. Dynamics and structure. *Journal of the Atmospheric Sciences, 45, 3137 - 3160.*

Proctor, F.H., 1989: Numerical simulations of an isolated Microburst. Part II. Sensitivity experiments. *Journal of the Atmospheric Sciences, 46, 2143 - 2165.*

Roskam, J., 1979: *Airplane flight dynamics and automatic flight controls.* Ed. Roskam Aviation and Engineering Corporation. Kansas, 1.388 pp.

Roskam, J., 1987: *Airplane desing. Part VI. Preliminary calculation of*

aerodynamic. Thrust and power characteristics. Ed. Roskam Aviation and Engineering Corporation. Kansas, 550 pp.

Sadeh, W.Z. and S.K. Mukherki, 1974: A wall jet in a shear stream. *Proceedings, 11th Annual Meeting Society of Engineering Science. Duke University, Durharm, N.C.,* 136 - 137.

Scheid, F. and R.E. Constanzo, 1991: *Métodos numéricos.* Ed. McGraw-Hill. Mexico, 709 pp.

Stoll, S.A., 1991: Microburst detection by the low level wind shear alert system. *Weather, 46,* 334 - 347.

Srivastava, R.C., 1985: A simple model of evaporatively driven Downdraft. Application to Microburst Downdraft. *Journal of the Atmospheric Sciences, 42,* 1004 - 1023.

Srivastava, R.C., 1987: A model of intense Downdraft driven by the melting and evaporation of precipitation. *Journal of the Atmospheric Sciences, 44.* 1752 - 1773.

Teske, M.E. and W.S. Lewellen, 1977: Turbulent transport model of a thunderstorm gust front. *Preprints 10th Conf. on Severe Local Storms, Omaha, American Meteorology Society,* 143 - 150.

Wakimoto, R.M. and W.M. Bringi, 1988: Dual polarization observations of

Microburst associated with intense convection. The 20 July storm during the MIST project. *Monthly Weather Review*, **116**, 1521-1539.

White, F.M., 1979: *Fluid mechanics*. Ed. Mc Graw-Hill. USA, 701 pp.

Williams, E.R., M.E. Weber and R.E. Orville, 1989: The relationship between lightning type and convective state of thunderclouds. *Journal of Geophysical Research*, **94**, 13213 - 13220.

Wilson, J.W., R.D. Roberts, C. Kessinger and J. Mc Carthy, 1984: Microburst wind structure and evaluation of Doppler radar for airport wind shear detection. *Journal Climate Applied Meteorology*, **23**, 898 - 915.

Wilson, J.W. and W.E. Schreiber, 1986: Initiation of convective storm by radar observed boundary layer convergent lines. *Monthly Weather Review*, **114**, 2516 -2536.

Zorpette, G., 1986: The menacing Microburst. *IEEE Spectrum*, Nov., 50 - 56.