

Las instalaciones de aerodinámica experimental de la E.T.S.I. Aeronáuticos

(Parte II: 1994-)

**Ángel Sanz, José Manuel Perales, José Mesequer,
Ana Laverón y Nikolai Bezdenejnykh**
Instituto Universitario "Ignacio Da Riva", E.T.S.I. Aeronáuticos,
Universidad Politécnica de Madrid

1. INTRODUCCIÓN

A finales de 1993 el Laboratorio de Aerodinámica ocupaba el ala sur de la planta -1 (semisótano) y unos despachos en la planta 1 de la misma ala del edificio A de la E.T.S.I. Aeronáuticos. En aquel momento se había producido un relevo generacional casi total en la plantilla de personal del Laboratorio, pues algunas de las personas que contribuyeron a la instalación del antiguo Laboratorio de Aerodinámica y Mecánica de Fluidos habían muerto (el Profesor Ignacio Da Riva había fallecido en 1991 y Domingo Rodríguez Manzano falleció a principios de 1994), otras se habían jubilado y otras estaban ejerciendo sus actividades profesionales en otros lugares.

En aquel año se estaba también a medio camino de un proceso general de remodelación de los edificios de la Escuela, que se tradujo en una nueva asignación de espacios para muchos de los Departamentos de la misma en un intento de armonizar las necesidades de carácter docente con las necesidades derivadas de las tareas de investigación y desarrollo cada vez más importantes en la ETSIA.

En este proceso de remodelación se convino que el Laboratorio de Aerodinámica concentrara su

actividad exclusivamente en la planta semisótano del edificio A, cediendo los locales ocupados en la primera planta (donde se encuentra en la actualidad el Departamento de Física) a cambio de modificar totalmente el hueco del semisótano, donde estaban las instalaciones de ensayos aerodinámicos, rebajando el nivel del suelo del Laboratorio con el fin de habilitar dos pisos donde antes había sólo uno.

Estas obras de remodelación significaron la destrucción de algunas de las instalaciones de ensayos aerodinámicos existentes entonces en la Escuela, así ocurrió con el túnel A1.1 y con otros túneles menores, y la cesión o donación de otras a ciertas Instituciones (el antiguo túnel de humos fue donado al Museo del Aire y el tubo de choque al INTA).

Tras la remodelación, el nuevo Laboratorio de Aerodinámica está organizado en torno a una habitación central de 25 m de longitud, 5 m de alto y 5 m de ancho, provista de un foso de 1 m de profundidad, 2.3 m de ancho y 22 m de largo. Este local central está rodeado en su perímetro por otras habitaciones dispuestas en dos pisos. En las habitaciones del piso inferior están un pequeño taller para elementos metálicos, la carpintería donde se realizan los modelos a ensayar, un taller de electrónica, la sala de control de los nuevos túneles, un par de habitaciones con instalaciones aerodinámi-

cas de pequeñas dimensiones y de aplicación básicamente docente, una sala de seminarios, y otras habitaciones de uso no directamente relacionado con la aerodinámica experimental. En el piso superior están las habitaciones donde se aloja el personal que realiza sus tareas docentes y de investigación y desarrollo en el entorno del Laboratorio así como el personal de administración y servicios.

La forma del hueco central del Laboratorio, con un foso longitudinal que deja una altura libre de 6 m, fue adoptada con el propósito de instalar un nuevo túnel aerodinámico de circuito cerrado, de modo que en el proyecto inicial del nuevo túnel aerodinámico de la ETSIA el conducto de retorno discurría parcialmente encajonado en el mencionado foso. Este proyecto inicial fue abandonado cuando se llegó al convencimiento de que para los intereses de la Universidad era mejor tener varias instalaciones de ensayos aerodinámicos, diversificadas, que una sólo, por lo que se adoptó este punto vista, fijándose como criterio de diseño la optimización del espacio disponible en vez de la optimización del rendimiento energético de las instalaciones a desarrollar. Este principio es la causa de que los nuevos túneles de la Escuela sigan siendo, como los primitivos, de cámara de ensayos cerrada y circuito fluido abierto (la corriente retorna a través del local) y de que en algunos se haya suprimido incluso el difusor posterior.

2. UN PRIMER TÚNEL PROVISIONAL

El acondicionamiento del remodelado Laboratorio de Aerodinámica se inició a mediados de 1994 (para disminuir costes, en la remodelación sólo se habían considerado las obras de albañilería y las ventanas, pero no las puertas ni las instalaciones eléctricas, que fueron colocadas por el personal laboral propio del Laboratorio y de los Servicios Centrales de la Escuela) y duró casi hasta finales de ese año. Además, durante los primeros meses, el Laboratorio de Aerodinámica se utilizó como almacén para una buena parte de los equipos del Laboratorio de Ensayos Materiales, cuyas obras de remodelación siguieron a las del Laboratorio de Aerodinámica.

Una vez el Laboratorio estuvo habitable, se inició en primer lugar la instalación del túnel hidrodinámico, situado en el foso, en uno de los extremos, a la par que se decidió construir un túnel ae-

rodinámico provisional que permitiera seguir ofreciendo el servicio de ensayos en túnel, además de las prácticas de los alumnos de la E.T.S.I.A., en tanto en cuanto no se construyeran las instalaciones definitivas.

El túnel provisional A4p se construyó en el primer trimestre de 1995 y ha estado en servicio hasta principios de 1997. Este túnel era de corriente aspirada movida por cuatro ventiladores comerciales SODECA serie HTC 90 de 0.9 m de diámetro, 8 palas y una potencia de 7.5 kW cada uno, dispuestos en una matriz de 2×2 . Hecho en madera y de sección cuadrada, este túnel era de geometría en extremo sencilla: no tenía contracción, por lo que la corriente entraba directamente en la cámara de ensayos, que tenía una sección de 1.2 m de lado. Tras la cámara de ensayos comenzaba el adaptador hasta los ventiladores, formado por cuatro conductos divergentes, cada uno de sección también cuadrada y después venían los ventiladores dispuestos como se ha dicho. El túnel A4p no tenía difusor y era, como todos los túneles aerodinámicos construidos hasta la fecha en el Laboratorio, de circuito fluido abierto.

Durante su corta vida en servicio el túnel A4p sufrió continuas modificaciones para ir mejorando sus prestaciones, sirviendo además como banco de pruebas para ciertas soluciones tecnológicas que después se han incorporado a los desarrollos posteriores. Las modificaciones efectuadas afectaron principalmente a la sección de entrada donde tras carenar las superficies exteriores para facilitar la entrada de la corriente de retorno, se probaron varios deflectores externos para canalizar suavemente hacia la boca de entrada la corriente exterior. Posteriormente, conforme los requisitos de los ensayos fueron siendo más severos, se rigidizó la cámara de ensayos y se la desacopló del resto del túnel y de la bancada que soportaba la instrumentación y, por último, se colocaron diversos elementos enderezadores de corriente y uniformizadores de turbulencia en la sección de entrada, con el propósito de conseguir una calidad de la vena fluida en la sección de ensayos razonablemente aceptable.

La velocidad del aire en la cámara de ensayos del túnel A4p llegaba hasta 30 m/s, de modo que el número de Reynolds de los ensayos estaba próximo a 10^6 . El túnel A4p era apropiado para ensayos de medida de distribuciones de presión sobre modelos (figura 1), pero su diseño no era el más conveniente para la medida de cargas globales. En

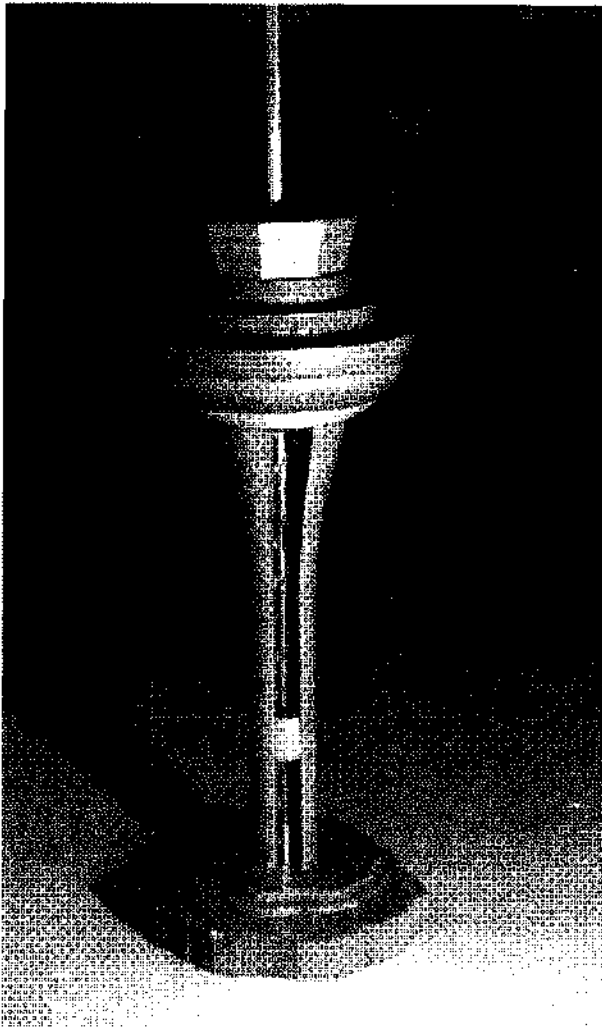


FIGURA. 1.
Modelo de la nueva torre de control del
Aeropuerto de Barajas.

efecto, la antigua balanza de Aerolab Supply Co. que había equipado los primeros túneles A1 y A1.1 había sido destruida a raíz de las obras de remodelación del Laboratorio, por lo que en el túnel A4p no se disponía de una balanza que integrara en un único equipo la medida de las diversas componentes de las cargas aerodinámicas. Éstas se podían medir sin problemas utilizando células de carga cuando era posible integrar la instrumentación de medida en las maquetas, pero el proceso de medida se complicaba enormemente si las células de medida habían de estar en el exterior del túnel, debido a la poca rigidez estructural del conducto, que se deformaba apreciablemente durante los ensayos.

Respecto a la calidad de la vena fluida, tras las primeras actuaciones realizadas en la sección de

entrada se consiguió una uniformidad de la vena fluida válida para los ensayos de aerodinámica civil, pero insuficiente para los ensayos de calibración de anemómetros, necesidad que surgió a mediados de 1996. Aunque se colocaron rejillas y un panel de abeja en la sección de entrada con el fin de uniformizar la velocidad en la sección de medida, pronto estuvo claro que con el túnel A4p, que no había sido diseñado para ensayos de calibración, era imposible alcanzar los requisitos impuestos por este tipo de ensayos, y como la construcción del nuevo túnel A9 iba llegando a su fin, en la primavera de 1997 se tomó la decisión de dar por finalizada la vida útil del túnel provisional A4p, substituyéndolo por otro nuevo diseñado específicamente para ensayos de calibración de anemómetros (el túnel S4).

3. LAS INSTALACIONES ACTUALES

Las instalaciones aerodinámicas actuales, los túneles A9 y S4, han sido diseñadas tratando de aprovechar al máximo el escaso espacio disponible, lo que ha llevado a eliminar ciertos elementos que requieren un gran volumen a costa de penalizar en cierta medida el rendimiento energético de ambos túneles.

En la concepción del túnel A9 se impuso como requisito principal que el tamaño de la cámara de ensayos fuese lo mayor posible, de modo que permitiera operar cómodamente en su interior durante los procesos de montaje y de desmontaje de las maquetas, amén de que la velocidad en la cámara fuera lo suficientemente alta como para que el número de Reynolds supere el valor de 10^6 . A resultas de lo anterior, el túnel A9 es un túnel de corriente aspirada, cámara de ensayos cerrada y circuito abierto (tipo Eiffel) que está montado sobre una estructura formada por diez pórticos, de modo que el suelo del túnel está a una altura de 2 m sobre el suelo del laboratorio (3 m sobre el suelo del foso), quedando debajo de él un amplio hueco donde están situados el túnel hidrodinámico de visualización y el túnel de calibración S4 (figuras 2 y 3).

El túnel A9 consta de una contracción bidimensional (la corriente sólo se contrae en uno de los planos de simetría del túnel, de forma que el techo y el suelo de la contracción son paralelos al techo y al suelo del Laboratorio mientras que las paredes verticales de la contracción describen una curva

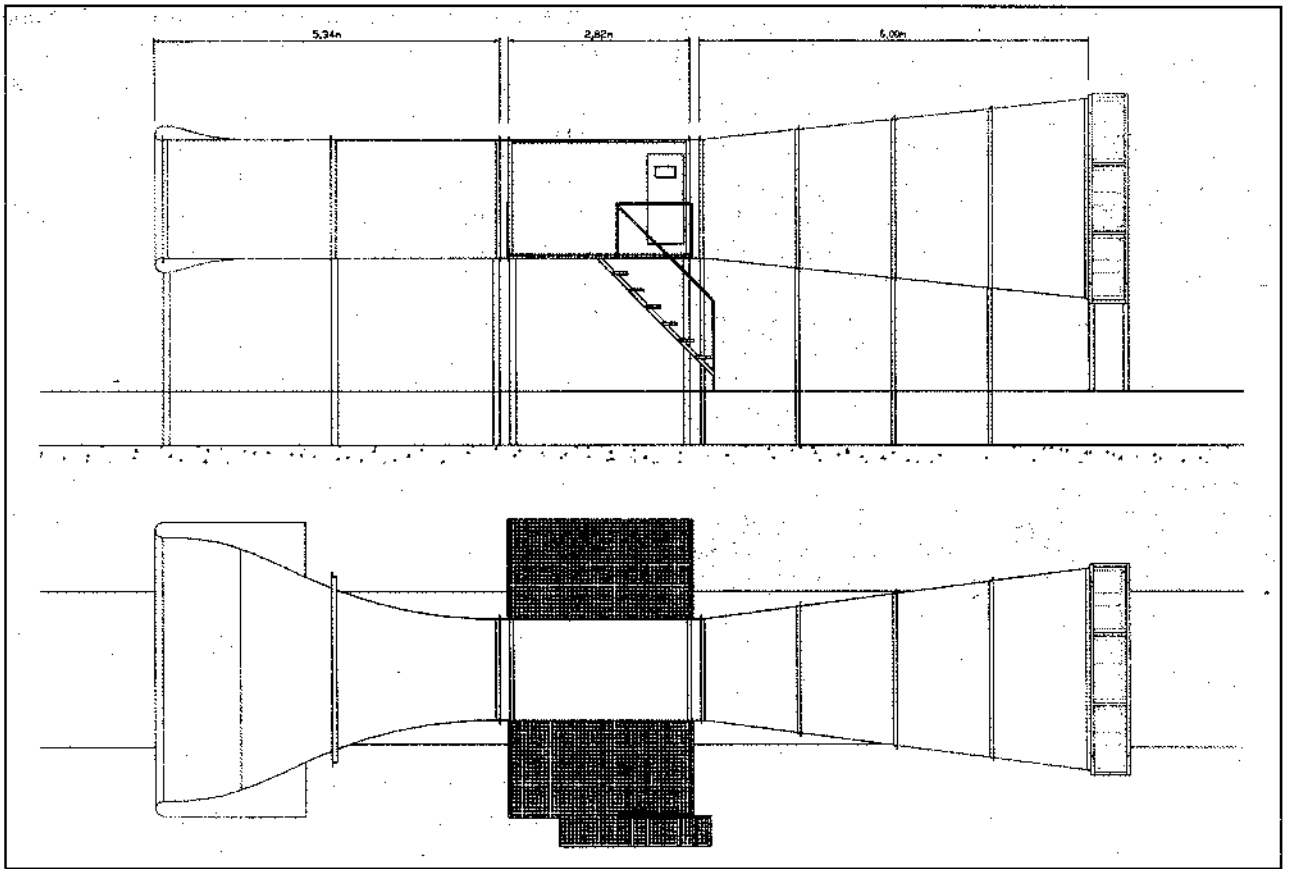


FIGURA 2.
Vista lateral y planta del túnel A9.

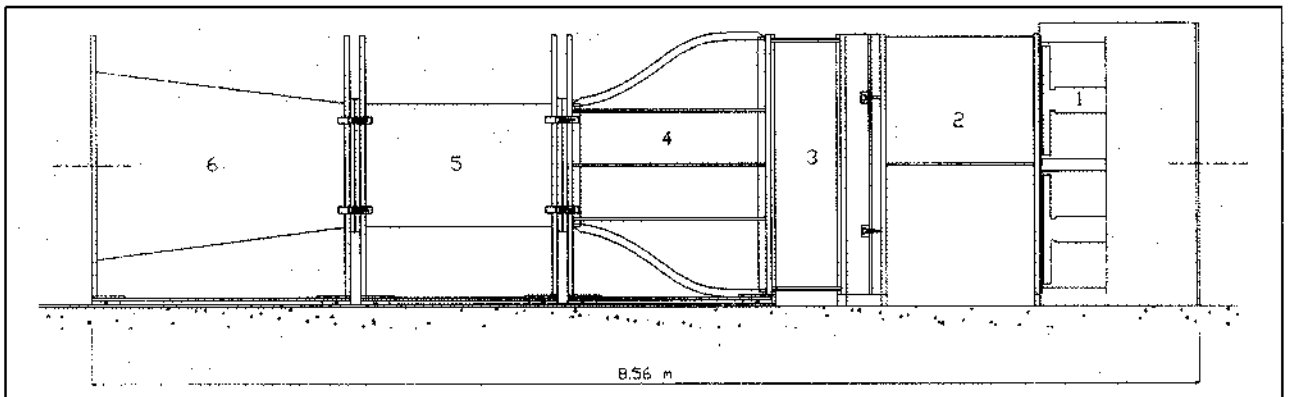


FIGURA 3.

Vista lateral del túnel S4: ventiladores (1), cámaras de tranquilización (2), enderezadores y uniformizadores de corriente (3), contracción (4), cámara de ensayos (5) y difusor de salida (6).

suave que adapta la sección de entrada a la cámara de ensayos). La sección de entrada de la contracción tiene 4.8 m de ancho y 1.8 m de alto y su longitud es de 5.35 m. La corriente de retorno llega a la contracción a través del Laboratorio, y ha de en-

trar en el túnel bordeando los labios superior e inferior de la misma, pues los lados laterales de la sección de entrada de la contracción llegan prácticamente hasta las paredes laterales del recinto donde está situado el túnel. Para evitar el desprendi-

miento de la corriente de retorno en la sección de entrada, los labios superior e inferior de la contracción están carenados exteriormente, al igual que el exterior de las paredes laterales.

La cámara de ensayos tiene 3 m de longitud y una sección de 1.8 m de alto y 1.5 m de ancho; a la cámara de ensayos se accede desde dos plataformas, una a cada lado del túnel, mediante sendas puertas. Debajo de la cámara de ensayos está la balanza para la medida de sustentación, resistencia y momento de cabeceo, diseñada y construida en el Laboratorio, y en el techo, además del sistema de iluminación de la cámara y los tubos Pitots de referencia, hay una cámara CCD que permite al operador observar la ejecución de los ensayos a través del correspondiente monitor situado en la sala de control. Aguas abajo de la cámara de ensayos está el adaptador a la sección de ventiladores, cuya longitud es de 6 m. El túnel A9 está impulsado por nueve ventiladores SODECA serie HTC 90 de ocho palas, con una potencia nominal de 10 kW y un diámetro interior de 0.9 m cada uno. Los ventiladores, dispuestos en una matriz de 3×3 , descargan directamente al local, pues como se ha dicho repetidamente, en el diseño de este túnel se prefirió optimizar el tamaño de la cámara de ensayos en vez del rendimiento energético del túnel, lo que llevó a suprimir el difusor de salida.

El uso primario del túnel A9, aparte de las actividades de orientación docente, es la medida de las cargas aerodinámicas (fuerzas y momentos globales y distribuciones de presión) sobre obstáculos no aeronáuticos, por lo que los requisitos exigidos a la vena fluida en la sección de ensayos son menos críticos que los del túnel S4. La balanza del túnel A9 es de tres componentes y está montada sobre una plataforma metálica que está desacoplada de la estructura del conducto del túnel.

Para la medida de las presiones sobre los modelos cada maqueta lleva un conjunto de tomas de presión, distribuidas sobre las superficies donde se quiere medir ésta, que se conectan mediante tubos flexibles a uno o más lectores secuenciales, semejantes a un revólver movido por un motor paso a paso (Scanivalve, modelo 48J7-1), que tienen cada uno 48 entradas más una toma de referencia. La posición de lectura de cada Scanivalve se controla mediante un actuador Scanivalve modelo JS4-48, que va conectando secuencialmente cada una de las entradas con uno de los lados del sensor de presión diferencial instalado en su interior. La posición de lec-

tura en la que se encuentra en cada instante el lector secuencial se determina con un decodificador Scanivalve modelo JOPOETM-48, instalado en cada uno de ellos. La presión dinámica en la cámara de ensayos se mide con un tubo de Pitot, Airflow modelo 3.3.311. Todas las señales diferenciales de presión se miden con cápsulas Druck modelo PDCR 22, unas instaladas en el interior de las Scanivalves y otra conectada a la señal de presión dinámica.

La señal eléctrica generada en las cápsulas de presión pasa a sendos acondicionadores de señal, Druck modelo DPI 260, que además proporcionan una indicación numérica visual del valor de la presión que se está midiendo. Las señales eléctricas analógicas, una vez filtradas, son medidas por un sistema de adquisición de datos IOtech modelo ADC 488, conectado a un bus IEEE 488 controlado por un ordenador. Este equipo de adquisición de datos posee también entradas y salidas digitales que permiten controlar y comprobar, a través de la correspondiente entrefase, la posición de lectura de los lectores secuenciales.

Además, para la medida de las cargas globales sobre los modelos se dispone de tres balanzas, las dos primeras son de tres componentes (una es extensiométrica y la otra piezoeléctrica) y la tercera (también extensiométrica) es de seis componentes. Se dispone también de varias cápsulas manométricas (tres de ellas integradas en lectores secuenciales de presión con 48 tomas de presión cada uno), anemometría de hilo caliente, desplazadores de sondas de tres ejes de alta precisión, cámara de vídeo de alta velocidad (hasta 2000 imágenes/segundo), cámara termográfica, etc. Todas las cadenas de medida están automatizadas y calibradas con patrones estándar.

El túnel S4 ha sido diseñado y construido en 1997 para cumplir específicamente los requisitos de calibración de anemómetros de cazoletas que exige la red MEASNET, un consorcio de instituciones europeas financiado por la Unión Europea cuyo propósito es establecer un patrón de calibración común a todos los laboratorios afinados en los territorios de la Unión. En este consorcio España está representada por el Centro de Investigaciones Energéticas, Medio Ambientales y Tecnológicas (CIEMAT), existiendo un acuerdo de colaboración entre CIEMAT y el Laboratorio de Aerodinámica de la Escuela para calibrar en éste los anemómetros. El estándar de calibración fijado por el consorcio MEASNET es en extremo exigente. Así, en lo que a calidad de la vena fluida en la

sección de medida se refiere, la norma aprobada establece que además de una gran estabilidad temporal en la sección de medida, la vena fluida ha de tener una gran uniformidad espacial y una muy baja turbulencia, de modo que en la sección de medida ha de haber un área de dimensiones comparables a las de un anemómetro de cazoletas en la que las velocidades no han de diferir en más de un 0,2% del valor medio, y que el coeficiente de correlación entre las medidas de velocidad efectuadas con los anemómetros y la velocidad medida con el tubo Pitot de referencia ha de ser superior a 0,99995 y con una repetibilidad entre calibraciones mejor que el 0,5%.

Ante estos requisitos y habida cuenta que por razones de falta de espacio el túnel S4 también tenía que ser de circuito fluido abierto, se decidió que este nuevo diseño fuera de corriente soplada en vez de corriente aspirada, pues de esta forma se consigue que las condiciones en la cámara de ensayos sean muy independientes de las diversas perturbaciones que puedan ocurrir en la sección de entrada del túnel, a costa, eso sí, de introducir aguas arriba de la sección de medida una perturbación (como son los ventiladores) mucho más fuerte que todas las demás, y amortiguar convenientemente los efectos de esta perturbación controlada antes de que alcance la cámara de ensayos.

Tras los cuatro ventiladores (del mismo tipo que los que impulsan el aire el túnel A9: SODECA serie HTC 90 de ocho palas y 0,9 m de diámetro) agrupados en una matriz de 2×2 existe una cámara de tranquilización de 1,2 m de longitud dividida en cuatro subcámaras, una por cada ventilador, que finaliza en la sección donde están los elementos de uniformización de la vena fluida (en primer lugar un panel de abeja de aluminio y a continuación diversas rejillas de porosidad decreciente) Tras pasar por estos elementos la corriente desemboca en una contracción de sección cuadrada, con una longitud de 1,5 m y una relación de contracción 4,5:1. Tras la contracción viene la cámara de ensayos, de 2 m de longitud en su versión actual y una sección frontal de forma cuadrada de 0,9 m de lado y, por último, está el difusor de salida, de 2,4 m de longitud y dividido en dieciséis conductos de modo que en cada uno de ellos se mantiene el ángulo de divergencia dentro del límite recomendado para evitar el desprendimiento de la capa límite.

A excepción de los ventiladores y de la cámara de tranquilización posterior a éstos, que están fijos

en el suelo del foso, todos los elementos del túnel S4 son móviles y en consecuencia fácilmente reemplazables por otros en caso de necesidad. Contracción, cámara de ensayos y difusor están montados sobre raíles que permiten el desplazamiento axial de los mismos y además el sistema de unión y anclaje de unos elementos con otros se ha pensado de modo que sea muy sencillo intercalar otros elementos entre los ya existentes, pues basta con soltar los cierres que mantienen unidas entre sí las diversas partes, desplazar la o las que haga falta mover, intercalar el elemento que se precise y unirlo a los elementos previos del túnel utilizando los mismos cierres.

A consecuencia de las crecientes actividades de calibración de anemómetros realizadas en el Laboratorio de Aerodinámica, en el año 1997 se decidió formalizar esta área de trabajo y solicitar la calificación del Laboratorio como ente reconocido de ensayo y calibración. Para tal fin se acudió a la convocatoria de ayudas del programa ATYCA del Ministerio de Industria y Energía (MINER), consiguiéndose una subvención para introducir en el Laboratorio un programa de garantía de calidad de acuerdo con la norma EN 45001 que le permita ser reconocido como Laboratorio de calibración. En paralelo con esta iniciativa, se han firmado acuerdos con instituciones y empresas con necesidades regulares de calibración de anemómetros, de modo que lo que hoy se denomina Laboratorio de Aerodinámica, Calibración y Ensayo (LACE) funciona como laboratorio asociado del CIEMAT y es utilizado como laboratorio de calibración de anemómetros por un creciente número de empresas nacionales.

Estas actividades de calibración de anemómetros coexisten con las actividades tradicionales de medida de cargas aerodinámicas sobre obstáculos de muy diversa naturaleza, donde, a modo de ejemplo, cabe citar que desde la entrada en funcionamiento del túnel A9 se han ensayado tres modelos básicos de automóviles, se han hecho ensayos para medir la resistencia aerodinámica de elementos señalizadores para líneas eléctricas, se han ensayado también diversos modelos de heliostatos y cuatro modelos de la cubierta del estadio de Atletismo de Sevilla y una del nuevo estadio del Betis C.F. También se han medido las características aerodinámicas de la plaza de toros de Las Ventas de Madrid así como efectos aerodinámicos estáticos y dinámicos en tableros de puentes en construcción. Más recientemente se han medido las cargas del viento so-

bre un modelo de la torre de control del aeropuerto de Málaga (figura 4) y se han llevado a cabo ensayos para determinar las características de apantallamiento de la plataforma de ensayo de motores del aeropuerto de Barajas y de barreras cortavientos para una mina de carbón a cielo abierto. Igualmente se ha ensayado un modelo del túnel de la carretera M-111 que discurre por debajo de las nuevas pistas del aeropuerto de Barajas y un modelo del nuevo edificio terminal del mismo aeropuerto.

La actividad creciente en este campo de la Ingeniería Aeronáutica en la Escuela ha aconsejado la introducción de un nuevo esquema organizativo compatible con las nuevas necesidades. Así, la docencia de las enseñanzas de Aerodinámica está encuadrada en el Departamento de Vehículos Aeroespaciales, y las actividades de investigación y desarrollo relacionadas con la aerodinámica experimental que se realizan en el LACE están canalizadas a través del Instituto Universitario "Ignacio Da Riva" (IDR/UPM), creado por el Decreto 487/97 de la Consejería de Educación y Cultura de la Comunidad de Madrid en la primavera de 1997.

Para finalizar, hay que señalar que la experiencia adquirida a lo largo de los casi cuarenta años de historia del Laboratorio en el diseño, construcción y operación de túneles aerodinámicos de baja velocidad y de bajo coste está empezando a tener también su proyección internacional. En noviembre de

1997 se firmó un acuerdo de colaboración con la Facultad Regional de Haedo (donde se imparte la carrera de ingeniero aeronáutico) de la Universidad Tecnológica Regional de Argentina, en el que entre otras áreas de cooperación docente y tecnológica se contempla la asistencia técnica para el diseño y construcción en Haedo, en la provincia de Buenos Aires, de un túnel aerodinámico de baja velocidad semejante a los existentes en la Escuela, túnel que está ya en funcionamiento. De igual modo se está diseñando en la actualidad otro túnel para usos docentes para el Instituto Tecnológico de Monterrey (México).

4. AGRADECIMIENTOS

Los autores desean espesar su agradecimiento a todas aquellas personas que han colaborado en el diseño, construcción y puesta a punto de las nuevas instalaciones de ensayos aerodinámicos de la E.T.S.I. Aeronáuticos, y aunque al confeccionar una lista siempre se corre el riesgo de dejar fuera de la misma a alguien, deseamos mencionar expresamente a Donato Franco, Rafael García, Miguel Ángel González, Fernando Gandía, Ernesto Gordo, Pedro López, José Manuel Moya, Manuel Ortega, Carlos Pascual, Javier Pascual, Manuel Pontón y Santiago Pindado.

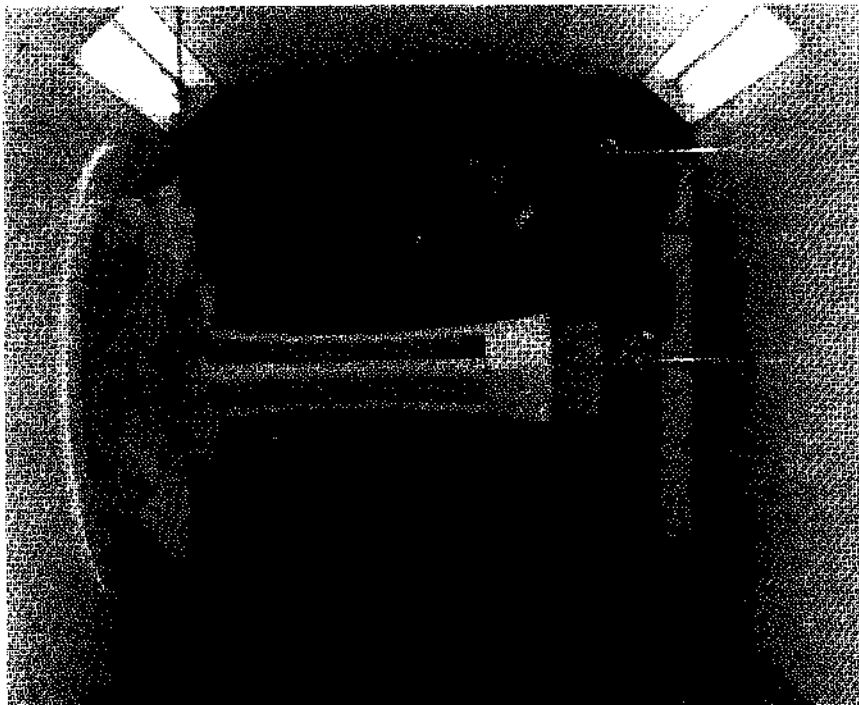


FIGURA 4.
Instalación del modelo de la torre de control del aeropuerto de Málaga en la cámara de ensayos del túnel A9.