

# Integración Instrumental y de software como equipamiento de un túnel de viento

J.L. Hernández Neira, M. Blázquez Merino

Departamentos de Física y Tecnología.

Instituto de Enseñanza Secundaria “Ramiro de Maeztu”.

Madrid. España

[jlhneira@gmail.com](mailto:jlhneira@gmail.com),

[manuel.blazquez.merino@gmail.com](mailto:manuel.blazquez.merino@gmail.com)

G.Carro Fernández, E.San Cristobal Ruiz, M. Castro

Gil

Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de

Control

Universidad Nacional de Educación a Distancia - UNED

Madrid - España

[germancf@ieee.org](mailto:germancf@ieee.org), [elio@ieec.uned.es](mailto:elio@ieec.uned.es),

[mcastro@ieec.uned.es](mailto:mcastro@ieec.uned.es).

**Abstract—** El proyecto que se presenta consiste en la realización práctica y constructiva de un túnel de viento aplicable en el laboratorio de Física y Tecnología del Instituto de Enseñanza Secundaria “Ramiro de Maeztu” de Madrid destinado a su empleo práctico para alumnos de bachillerato. El túnel de viento forma parte de los trabajos tanto de estudio teórico del currículo de la materia como de investigación en materia de Física y Tecnología Aplicada. El proyecto se ha planificado en tres fases, la primera de las cuales ha consistido en la realización práctica y puesta en servicio del citado equipamiento aerodinámico al que se ha dotado de instrumentación analógica. Como segunda fase de la planificación, se prevé la incorporación de un sistema de medida y adquisición de datos de carácter digital controlado desde una aplicación a modo de interfaz entre el usuario y el sistema instrumental. Finalmente, está previsto en la fase tercera y final, la incorporación de un sistema remoto de acceso a la aplicación y por tanto, a la experimentación con el túnel de viento.

*Túnel de viento; física; tecnología; experimentación; bachillerato; instrumentación*

## I. INTRODUCCIÓN

Los alumnos del Bachillerato Internacional [1] (BI) del Instituto de Enseñanza Secundaria “Ramiro de Maeztu” de Madrid [2], tienen la obligación de hacer una monografía sobre un tema de investigación de su elección en el marco de las materias que forman parte de su currículo. En este sentido, el centro se provee del material necesario para que los alumnos puedan desarrollar su propuesta de investigación.

Se ha observado que, en muchos casos, se realiza un enorme esfuerzo por parte de los estudiantes para realizar trabajos que implican la construcción de la propia instrumentación multiplicando esfuerzos y costes. Por ejemplo, cada estudiante que desea hacer investigaciones en el área de la aerodinámica construye su propio túnel de viento que, al margen de la fiabilidad que una construcción de circunstancias pueda tener, luego desmonta y deja de tener utilidad.

En el curso 2010-2011 se han propuesto al departamento de Física y Química, al menos seis monografías relacionadas con

fenómenos aerodinámicos lo que supondría que cada alumno construyera su propio túnel de viento y su propia instrumentación. Los títulos provisionales de las monografías que se propusieron para el citado curso fueron diversos y complejos y han llevado a sopesar la idea de la realización de un instrumento común con mejores prestaciones que los que los alumnos son capaces de construir para su propio uso es precedente.

El túnel aerodinámico del IES Ramiro de Maeztu se ha proyectado con la idea de cubrir un conjunto de objetivos concretos. La idea básica subyacente era comenzar a dotar al instituto de una infraestructura adecuada que permitiera a los alumnos de Bachillerato Internacional, así como a cualquier otro estudiante de Bachillerato que lo deseara, realizar trabajos de investigación susceptibles de ser presentados como “Monografías”, que siendo preceptivas en el BI se consideran muy formativas y, por tanto, ofertables al resto de los alumnos de Bachillerato.

Los departamentos de Física y Química y Tecnología se han puesto de acuerdo para ir desarrollando, poco a poco, la instrumentación necesaria para facilitar que este trabajo de los alumnos no se pierda y pueda ser aprovechado por otros, así como facilitar su aprendizaje de las técnicas de trabajo de un equipo de científicos profesionales.

En esta línea, y siguiendo las directrices del currículo oficial de Bachillerato, el túnel aerodinámico se ha realizado como una oportunidad para poder elevar los estudios de carácter teórico de los alumnos de Bachillerato a la formación en investigación de futuros físicos e ingenieros.

Motivados por las primeras realizaciones prácticas, se pensó aumentar la colaboración con el departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Control de la Universidad Nacional de Educación a Distancia, quién en todo momento estuvo interesado en formar parte del consorcio. En este caso, una vez terminados los trabajos de construcción y una vez puesto en funcionamiento el instrumento para realizar las primeras comprobaciones y ajustes, se observó la viabilidad en la puesta en práctica de la segunda fase, el equipamiento

adicional y la instrumentación necesaria para realizar las medidas oportunas mediante sistemas detectores y sensores.

El proyecto, actualmente en desarrollo en esta fase, comprende la conexión de una multiplicidad de dispositivos sensores a un sistema de control y medida digital asistido por una aplicación informática que adquiere los señales digitales correspondientes a las medidas y las convierte en valores numéricos por el fin de trasladar los mismos a un sistema de cálculo

La tercera fase del proyecto, aún por definir, consistirá en la realización de los trabajos necesarios para que el sistema informático se conecte a la red como un laboratorio remoto, de forma que el túnel de viento pueda ser operado a través de un interfaz por cualquier usuario siguiendo un calendario preestablecido.

## II. CONSTITUCIÓN DEL INSTRUMENTO DE MEDIDA

Siguiendo un modelo estándar [3] de túnel de viento, el dispositivo se constituye por cinco módulos: un módulo de entrada de aire y linealización de flujo, un cono de contracción, sendas cámaras de ensayos y de difusión y finalmente, un ventilador extractor del aire. En la figura 1 se puede observar una representación esquemática de las partes constituyentes del aparato de medida.

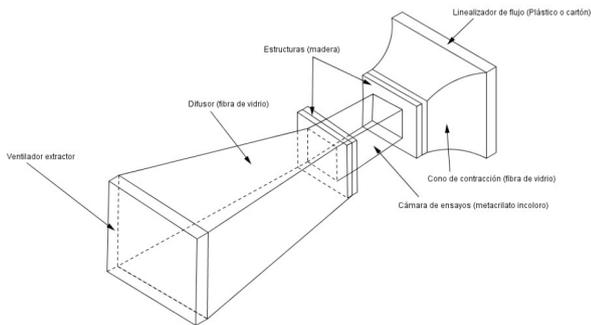


Figura 1. Representación esquemática de las partes constituyentes del túnel de viento

Las principales características, dimensiones y equipamiento de cada una de las partes se enumeran a continuación según el orden de circulación del flujo de aire.

### A. Módulo de entrada de aire y linealización del flujo.

Está constituido por una estructura de dimensiones superficiales superiores al espesor, preferiblemente fabricado en plástico o cartón, que consta de conductos lineales acoplados lateralmente, de modo que el aire es obligado a circular por dichos conductos, tal y como se observa en la fotografía de la figura 2. El efecto que se consigue con el módulo es que el aire se introduzca en forma de finos haces de flujo laminar. Las dimensiones, tanto en la sección de entrada como en la de salida son de 600 x 600 milímetros, siendo el recorrido longitudinal del flujo al paso por el módulo de 100 milímetros.



Figura 2. Aspecto del módulo de entrada y linealización del flujo.

### B. Cono de contracción

El módulo se encuentra directamente acoplado al módulo de linealización del flujo, y está destinado a contraer el flujo de aire a fin de aumentar la velocidad del mismo. Su realización se basa en una estructura casi troncopiramidal de sección decreciente y ha sido realizada en fibra de vidrio. Sus dimensiones de entrada son iguales que las de salida del módulo de linealización, esto es 600 x 600 milímetros, para un acoplamiento exacto. Dada la reducción progresiva de sección, el cuadro de salida tiene unas medidas de 300 x 300 milímetros, lo que supone una reducción de 4 veces su área. El flujo recorrerá una longitud de 600 milímetros antes de penetrar en el siguiente módulo. En la figura 3 se muestra el aspecto del módulo tras su fabricación.



Figura 3. Aspecto exterior del perfil del cono de contracción

Igualmente en la figura 4 se proporciona un gráfico en el que se observa las medidas de la semisección de módulo.

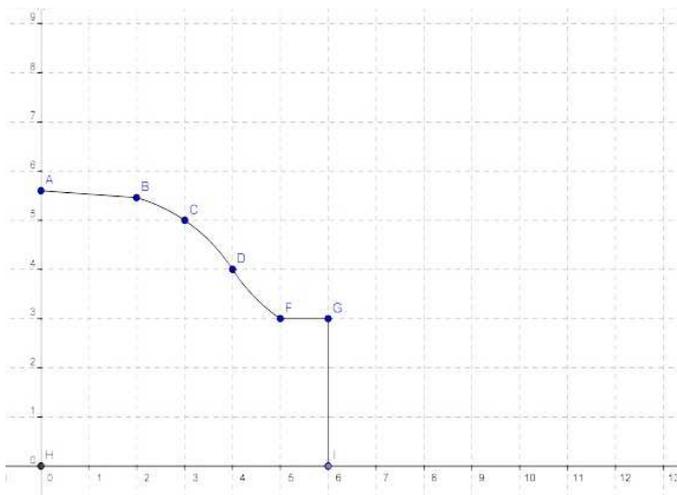


Figura 4. Representación gráfica de las medidas de semisección empleadas en el cono de contracción.

### C. Cámara de ensayos

Esta sección se puede considerar el núcleo del dispositivo dado que su principal función es la de alojar los modelos de prueba y los dispositivos de instrumentación para realizar los procesos de experimentación. Esta sección se ha realizado en metacrilato transparente y su forma es prismática. Las medidas tanto de entrada como de salida corresponden a una sección cuadrada de 300 milímetros por 300 milímetros prolongándose en una longitud de 500 milímetros

### D. Cámara de difusión

Una vez que el flujo de aire ha superado la cámara de ensayos, se ha añadido un módulo adicional de fibra de vidrio de sección troncocónica, al que se le ha dotado de una pendiente suave a lo largo del metro de longitud que constituye la dimensión en línea con el flujo, tal y como se puede observar de las fotografías de la figura 5.

Para realizar esta contracción, la cámara dispone de una reducción lineal de sección en función de la longitud de recorrido, pasando de unas dimensiones de entrada de 300 milímetros de lado a una sección de salida a través de un marco cuadrado de 600 milímetros de lado. Con esta ampliación entre la entrada y la salida se consigue la reducción de velocidad en el flujo de aire

### E. Ventilador extractor

Con el fin de provocar la corriente de aire a través del instrumento, se ha situado un ventilador directamente acoplado a la cámara de difusión de forma que el aire de túnel se extraerá produciendo un régimen laminar en la cámara de ensayos. La potencia del ventilador como elemento activador del flujo de aire genera un caudal de aire de  $12480 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  y es capaz de elevar la velocidad del aire en el interior de la cámara hasta los  $80 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ , lo que proporciona un buen escenario para la realización de diversos experimentos.

## III. EMPLEO DEL INSTRUMENTO DE MEDIDA EN EL AULA

La etapa de bachillerato, especialmente en la modalidad de Bachillerato Internacional, requiere la elaboración de monografías. Esto ha puesto en evidencia la necesidad de poner en funcionamiento el túnel de viento cuanto antes para atender la demanda de monografías en el ámbito de la aerodinámica manifestada por los alumnos. Para la experimentación se ha planteado la creación de diversos modelos sobre los que se ha experimentado los efectos de las corrientes de aire provocadas en un entorno controlado.



Figura 5. Aspectos de la cámara de difusión

De esta forma, se ha conseguido la realización de un dispositivo con estructura modular pensado para una triple misión. La primera es la de servir, en sí mismo, como fuente de temas de investigación, al permitir tanto el cambio de forma como de materiales constructivos de cada uno de sus módulos. Como segunda misión se enfoca al servicio como fuente de investigación en el ámbito del desarrollo de sensores para diferentes tipos de ensayos aerodinámicos. Por último, que desde el punto de vista didáctico es el más importante, permite la realización de trabajos de investigación en el campo de la aerodinámica.

Entre los modelos propuestos y experimentados se han planteado la elaboración de las siguientes monografías de las que se han obtenido los primeros resultados:

- ▲ Efectos del viento y la luz exterior sobre la Torre Gherking de Londres creada por el arquitecto Norman Foster.
- ▲ Efectos del viento sobre el perfil aerodinámico de determinados modelos de automóviles.
- ▲ Estudio del efecto de la velocidad del viento sobre pelotas y balones en movimiento.
- ▲ Estudio aerodinámico de las formas geométricas básicas como esferas, cilindros y conos.
- ▲ Estudio aerodinámico del movimiento de un esquiador en la modalidad de descenso en esquí alpino.
- ▲ Estudio aerodinámico del perfil de un ala de avión.
- ▲ Comprobación del efecto Magnus.
- ▲ Movimiento de cuerpos en el seno de un fluido.

## IV. EQUIPAMIENTO ANALÓGICO DE MEDIDA

Las pruebas del dispositivo han dado muy buenos resultados respecto a la estabilidad y a la integridad mecánica tras el ensamble del instrumento. Se ha observado que nivel de

vibración transmitido desde el ventilador es mínimo y su efecto sobre el interior de la cámara de ensayos es despreciable.

Posteriormente, se ha equipado el túnel de viento con elementos sensores analógicos para la realización de medidas de presión estática y velocidad del fluido. Para las primeras se han empleado manómetros de columna de líquido. Se ha elegido este tipo de manómetro, frente a los tipos Bourdon, de fuelle o de tubo helicoidal, por tratarse de un instrumento de medida de acoplamiento sencillo para poder comenzar a realizar mediciones y por su aspecto ciertamente didáctico, para que los alumnos sean capaces de relacionar el desplazamiento del líquido en el manómetro con el efecto de la presión en el interior de la cámara.

En efecto, se trata de un sistema de medición indirecto ya que para obtener la medida de presión en función de la altura del líquido en el manómetro se requiere conocer la densidad del mismo.

Por otra parte, el sistema no ofrece un gran nivel de exactitud en la medida, aunque como instrumento inicial la precisión es suficiente para los trabajos relacionados con este primer acercamiento al proyecto.

Para la medida de velocidad de fluido en el interior de la cámara se ha instalado sendos tubos de Pitot-Prandtl [4], construidos al efecto y conectados a un segundo manómetro de columna de líquido. En la figura 6 se puede observar la representación del tubo de Pitot con el que se ha equipado el instrumento.

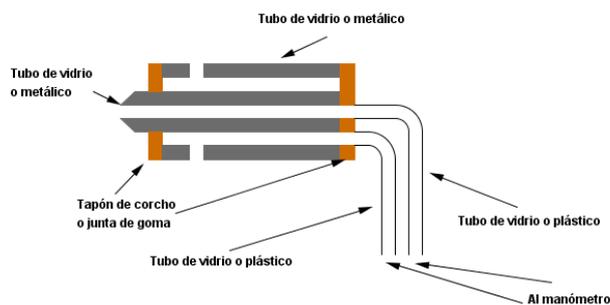


Figura 6. Esquema del tubo de Pitot-Prandtl empleado para la medida de velocidad del fluido

## V. PRIMERAS PRUEBAS DE AJUSTE

Desde su puesta en funcionamiento, se han realizado pruebas en el túnel a fin de desarrollar la metodología adecuada para su optimización. Para ello se han medido simultáneamente presiones estáticas y velocidades del fluido para distintos caudales del ventilador extractor obteniéndose los resultados que se muestran en la tabla I.

TABLA I. RESULTADOS OBTENIDOS EN ENSAYO DEL INSTRUMENTO

Correspondencia velocidad-presión (medidas experimentales realizadas por los alumnos)					
Medidas de salida		Medidas en el interior de la cámara		Medidas de entrada	
Hs (mm)	Vs (km/h)	Hc (mm)	Pc (Pa)	He (mm)	Ve (km/h)
4	14,4	1	9,8	2	7,2
4	14,4	2	19,6	3	10,8
7	25,2	5	49	6	21,6
11	39,6	7	68,6	13	46,8
16	57,6	13	127,4	16	57,6
19	68,4	14	137,2	18	64,8
19	68,4	18	176,4	19	68,4
20	72	18	176,4	19	68,4
19	68,4	18	176,4	19	68,4

En dicha tabla se observa que las medidas han sido obtenidas por lectura directa de la altura de líquido en los manómetros situados a la entrada del fluido en la cámara (He), en su seno (Hc) y a la salida de la misma (Hs). Esto ha permitido la conversión de estos datos en las velocidades de entrada y salida de la cámara (Ve, Vs) y de la presión en su interior (Pc).

Para el ajuste del equipo se han realizado ciertos cálculos enfocados a su calibración basados en la confirmación de la ecuación de Bernouilli. En la tabla II se ofrece los resultados del análisis de la constante de Bernouilli obtenida por aplicación para dos secciones, la de entrada Ke y la de salida Ks. Para la interpretación de los datos se han trasladado los mismos a una gráfica comparativa que se muestra en las figuras 7 y 8 de la que se extraen dos observaciones. La primera, que la fiabilidad en las medidas del instrumento mejora con la presión. La segunda conclusión está relacionada con que la ecuación de Bernouilli se cumple en mayor medida según aumenta la presión en el interior de la cámara.

TABLA II. RESULTADOS OBTENIDOS EN ENSAYO DEL INSTRUMENTO

Presión P	Salida Vs	Entrada Ve	Ks	Ke	Ks/Ke
9,8	14,4	7,2	134,2	40,9	3,3
19,6	14,4	10,8	144,0	89,6	1,6
49	25,2	21,6	430,0	328,9	1,3
68,6	39,6	46,8	1009,5	1382,7	0,7
127,4	57,6	57,6	2118,1	2118,1	1,0
137,2	68,4	64,8	2944,3	2656,6	1,1
176,4	68,4	68,4	2983,5	2983,5	1,0
176,4	72	68,4	3286,8	2983,5	1,1
176,4	68,4	68,4	2983,5	2983,5	1,0

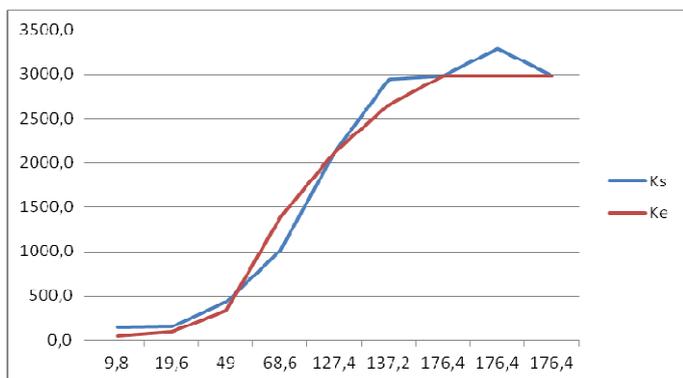


Figura 7. Análisis de la constante de Bernouilli para las secciones de entrada y salida.

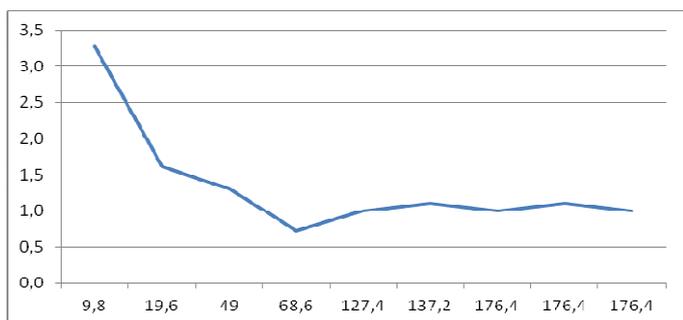


Figura 8. Comparación de ambas constantes en función de la presión en el interior de la cámara

## VI. EXTENSIÓN DEL SISTEMA AL EQUIPAMIENTO DE MEDIDA DIGITAL

A la vista del funcionamiento del instrumento y dado el éxito en su empleo en el laboratorio se ha decidido iniciar una segunda fase para su ampliación. Esta consiste en el equipamiento instrumental [5] de tipo digital, mediante el cual se puede incrementar los puntos de medida tanto de presiones como de velocidades del fluido.

De esta forma, se extraerán datos, no sólo con más fiabilidad sino que al obtener mayor cantidad de medidas, se podrá extender el estudio del comportamiento de objetos de una manera más precisa según su geometría.

En la figura 9 se ha representado el esquema del despliegue proyectado en el que se incluirán una serie de sensores de presión y temperatura de alta sensibilidad en paralelo con los actuales elementos de medida. Tras adquirir y acondicionar las señales de los sensores, éstas serán incluidas en un módulo de tratamiento de datos.

Los mismos análisis indicados en el anterior apartado serán los que formarán los algoritmos piloto para el funcionamiento de la nueva versión del túnel de viento.

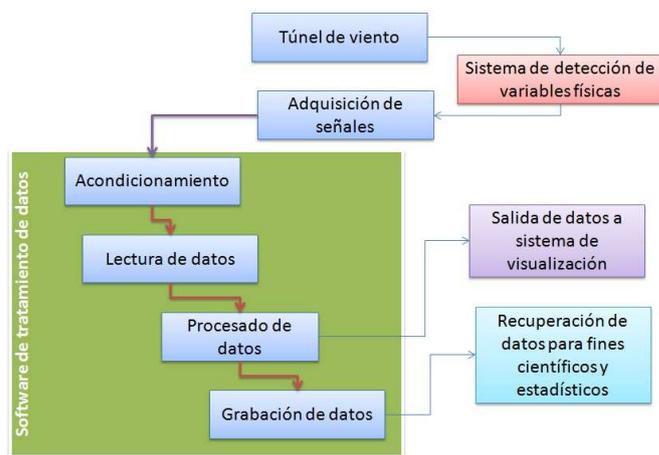


Figura 9. Esquema del sistema de instrumentación digital, adquisición y tratamiento de datos

Mediante el sistema software instalado se realizarán tanto las tareas de procesado como de grabación de datos relacionadas con un experimento o serie de experimentos, además de los servicios de visualización y extracción de datos habituales en estos paquetes informáticos.

## VII. TERCERA FASE DEL PROYECTO: EL LABORATORIO REMOTO

El avance en las redes de comunicaciones y datos como Internet y la mejora en los lenguajes de programación han dado lugar a nuevas herramientas de aprendizaje electrónico que facilitan el aprendizaje a distancia y el aprendizaje mixto o *blended learning*.

Una de las herramientas que está alcanzando mayor popularidad es la de los laboratorios remotos. Estos son sistemas software y hardware que permiten a los alumnos llevar a cabo experimentos desde cualquier lugar y en cualquier momento. Actualmente, podemos encontrar un gran número de universidades de todo el mundo, que está desarrollando este tipo de laboratorios [6-9]. Esto es debido a las ventajas que ofrecen. Algunas de estas son:

- ▲ Los estudiantes pueden acceder a los instrumentos en cualquier momento. Por tanto el uso del laboratorio no se limita a las horas de clase.
- ▲ El alumno trabaja con instrumentos reales y no simulados.
- ▲ El alumno puede acceder al laboratorio desde cualquier ordenador que tenga una conexión a Internet.

Por esta razón el Instituto de Enseñanza Secundaria “Ramiro de Maeztu” de Madrid en colaboración con el departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Control de la Universidad Nacional de Educación a Distancia, pretende hacer accesible el túnel de viento para que los alumnos puedan hacer prácticas de forma remota. Para ello se está definiendo la siguiente arquitectura, tal y como se representa en la figura 9:

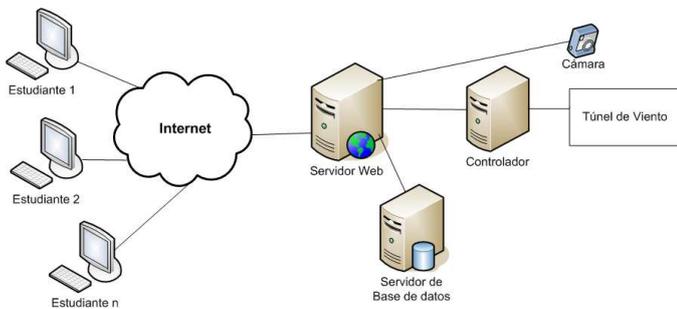


Figura 10. Arquitectura del laboratorio remoto

Como se puede observar en la figura 10, varios elementos deben ser diseñados e implementados. A continuación se explicará cada uno de ellos:

- ▲ Controlador. Es el encargado de recibir los datos del túnel de viento y enviarlos al servidor web. También, será el encargado de establecer los parámetros de entrada necesarios para realizar la práctica.
- ▲ Cámara o servidor de audio y video. Este enviará las señales de audio y video al servidor web. Así el alumno podrá ver el túnel de viento lo que le dará sensación de realismo.
- ▲ Servidor de base de datos. Almacena los datos enviados por el túnel de viento.
- ▲ Servidor web es el encargado de enviarle al estudiante la página o aplicación web que le permita experimentar sobre el túnel de viento y ver los resultados.  
Un aspecto importante es la planificación. Es decir, solamente un alumno podrá acceder en un momento determinado al túnel de viento y experimentar con él. Para ello se implementará, un servicio de planificación, calendario.
- ▲ Estudiante, solo necesita una conexión a Internet y un navegador.

Todos estos elementos permitirán que los profesores puedan crear experimentos sobre el túnel de viento y que sus alumnos, desde su casa, puedan llevarlos a cabo.

Por último, se quiere indicar, que no solamente se desea dar acceso al laboratorio, sino integrar dicho laboratorio en otros sistemas de aprendizaje como sistemas de gestión de aprendizaje, o sistemas de compartición de experimentos como iLab Project [10]. Esto facilitará el proceso de enseñanza y aprendizaje y la utilización de dicho laboratorio por otras universidades.

## CONCLUSIONES

Según lo expuesto a lo largo del presente artículo, se ha diseñado y se está llevando a cabo la realización de un túnel de viento en el Instituto “Ramiro de Maeztu” de Madrid, con la idea de cubrir un conjunto de objetivos concretos, entre los que destacan poder dotar al instituto de una infraestructura adecuada que permita a los alumnos de Bachillerato la realización de trabajos de investigación, para poder elevar sus estudios de carácter teórico a la formación en investigación de futuros físicos e ingenieros.

El equipamiento instrumental sigue una programación por etapas. La primera, ya finalizada, permite el empleo del instrumento de medida para la recuperación de datos físicos experimentales mediante instrumentación analógica. La segunda etapa, en proceso, consiste en el equipamiento de instrumentación electrónica y la creación de un software específico para manejar e interpretar los datos obtenidos. Finalmente, la tercera etapa ya diseñada y planificada, pero pendiente de implementar consiste en la conexión del túnel de viento a un controlador y los servidores web y de base de datos apropiados para emplear el instrumento como un laboratorio remoto.

## REFERENCIAS

- [1] Sitio web del Bachillerato Internacional. <http://www.ibo.org/es/> última visita: 10 de febrero de 2012
- [2] Sitio Web del Instituto “Ramiro de Maeztu” de Madrid, España. <http://www.educa.madrid.org/web/ies.ramirodemaetzumadrid/> . Última visita:10 de febrero de 2012.
- [3] Rocío García Martínez. “Determinación de metales pesados en la precipitación pluvial de una zona urbana en Ciudad de México y de una zona rural”. Tesis Doctoral de ciencias. Universidad Nacional Autónoma de México. México DF. 2007
- [4] Joseph B. Franzini y E. John Finnemore. “Mecánica de Fluidos con aplicaciones en Ingeniería”. Ed. McGraw-Hill. 1999.
- [5] Ramón Pallás Arenys. “Sensores y Acondicionadores de Señal”. 4ª edición. Editorial Marcombo, 2005.
- [6] I. Gustavsson. Telemanipulator for Remote Wiring of Electrical Circuits. Artículo Congreso REV 2008, Dusseldorf.
- [7] J. García-Zubia, P. Orduña, I. Angulo, J. Irurzun and U. Hernández, “Towards a Distributed Architecture for Remote Laboratories” iJOE – Volume 4, Special Issue 1: REV2008, July 2008.
- [8] D. Lowe, S. Murray, E. Lindsay, D. Liu, “Evolving remote laboratory architectures to leverage emerging Internet technologies”. IEEE Transactions on Learning Technologies. vol. 2, n. 4, pp 289-294. 2009.
- [9] Sancristobal, M. Castro-Gil, P. Baley, K. DeLong, J. Hardison, and J. Harward, “Integration View of Web Labs and Learning Management Systems” IEEE EDUCON 2010 IEEE Engineering Education 2010
- [10] Harward, V.J., del Alamo, Choudary V. S., DeLong K., Hardison J. L., Lerman S. R., Northridge J., Varadharajan C., Wang S., Yehia K., and Zych D., (2004). BiLabs: A scalable architecture for sharing online laboratories, presented at the Int. Conf. Eng. Educ. 2004, Gainesville, FL, Oct. 16–21, 2004.