

Ingeniería

Revista Semestral de la Universidad de Costa Rica

ISSN 1409-2441

Vol. 16 (2)

Ago/Dic 2006

CONTENIDO

Artículos

1. Estudio catódico de cinética de corrosión del acero al carbón en fluido geotérmico mediante un electrodo de disco rotatorio..... 17-22
Vega, Mario.
2. Sintonización de controladores *PI* y *PID* utilizando modelos de polo doble más tiempo muerto 23-31
Solera, Eugenia; Alfaro, Víctor.
3. La naturaleza de la Ingeniería..... 33-43
Herrera, Rodolfo.
4. Dimensionado y construcción de un túnel de viento de baja velocidad 45-54
Monge, Juan Gabriel.
5. Centrifugal fan impeller failure analysis using finite elements..... 55-62
Monge, Juan Gabriel.
6. Nuevo formato de datos para el Laboratorio de Ingeniería Sísmica del Instituto de Investigaciones en Ingeniería de la Universidad de Costa Rica..... 63-74
Moya, Aarón.
7. Evaluación de la potencia de operación de un eje de turbina vertical mediante el método de elementos finitos 75-83
Monge, Juan Gabriel.
8. Representación de lenguajes de patrones de análisis de dominio 85-101
Calderón, Alan.
9. Evaluación del concreto con reductor de agua en clima cálido 103-111
Solís, Romel; Moreno, Eric; Chuc, Nadine.

Nota técnica

- Experiencia docente en la Universidad de Costa Rica en el uso de puntos de función y metodologías orientadas a objetos para estimar proyectos de software 115-127
Salazar, Gabriela.

Normas

- Normas para la presentación de artículos a la Revista Ingeniería..... 131-138

Ingeniería

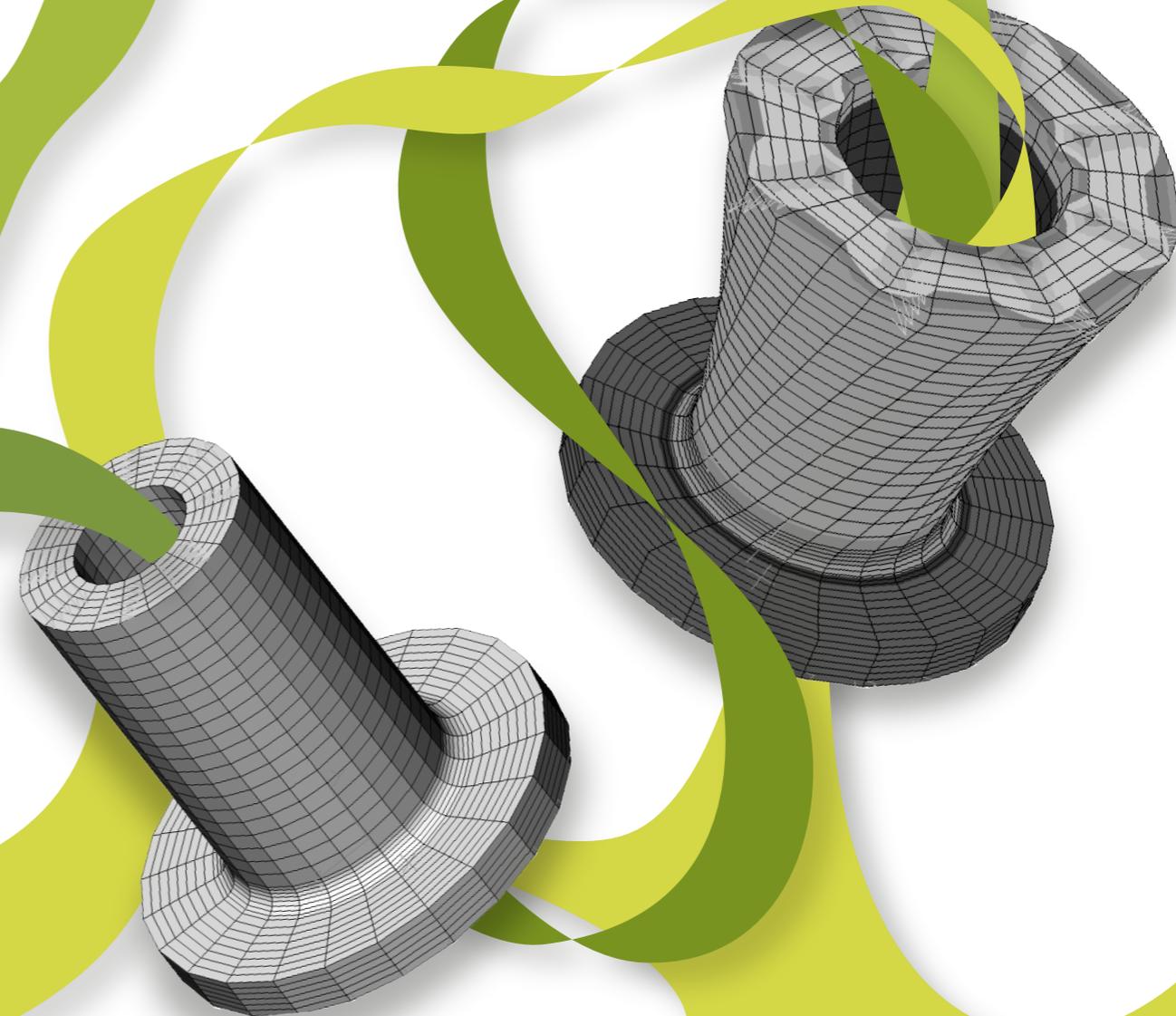
Revista de la Universidad de Costa Rica
AGOSTO/DICIEMBRE 2006 - VOLUMEN 16 - Número (2)

Número (2)

Agosto / Diciembre 2006

Volumen 16

REVISTA INGENIERÍA



DIMENSIONADO Y CONSTRUCCIÓN DE UN TÚNEL DE VIENTO DE BAJA VELOCIDAD

Juan Gabriel Monge Gapper

Resumen

La Facultad de Ingeniería de la Universidad de Costa Rica ha planteado adquirir un túnel de viento de baja velocidad, con una sección de pruebas de tamaño suficiente para caracterizar y cuantificar el comportamiento de modelos estructurales en un flujo de aire controlado. Este artículo analiza la utilidad de un túnel de viento con tales características para la investigación y la industria en Costa Rica, y presenta algunos aspectos que lo hacen apropiado para las condiciones de la Facultad.

El diseño y construcción del túnel, su infraestructura, y parte del equipo de medición necesario estaría a cargo de la Facultad, en lugar de adquirir equipos comerciales importados. Ello reduce la inversión y la experiencia de diseño y construcción se hace y permanece en el medio nacional.

Palabras clave: túnel de viento subsónico, aplicaciones para túnel de viento, tecnología apropiada, equipo didáctico, I&D local.

Abstract

The Faculty of Engineering at the University of Costa Rica has recognized the need for a low speed wind tunnel for research and teaching. The fundamental short-term objective is to characterize and quantify the behavior of structural models under controlled flow conditions. This article intends to state the usefulness of such a wind tunnel for research and industry in Costa Rica, and show the main design decisions taken to adjust to the Faculty conditions.

Faculty staff could complete design and construction of the tunnel and part of the measurement devices. This means a significant reduction in costs; experience in the field is made and kept in the country as autonomous technology.

Keywords: subsonic wind tunnel, appropriate technology, educational equipment, wind tunnel applications, local R&D.

Recibido: 06 de marzo del 2005 • **Aprobado:** 16 de mayo del 2006

1. INTRODUCCIÓN

El túnel de viento es una herramienta que, con el tiempo, no sólo se ha vuelto más confiable, sino que ha encontrado amplia gama de aplicaciones, sin requerir excesiva especialización de sus características constructivas. Por lo general, se lo asocia a la aviación; no es aventurado que la tecnología de los túneles de viento sea simultánea de la aviación. El túnel empleado por los hermanos Wright es uno de los más conocidos porque se llevaban a cabo experimentos para evaluar las características de diferentes perfiles de ala.

En lo fundamental, el objetivo general del túnel no ha cambiado. Ante la inexistencia o inconveniencia de modelos matemáticos apropiados para conocer el comportamiento de un objeto con velocidad relativa a un fluido, lo mejor es llevar a cabo una experimentación directa, de manera que se puedan tomar mediciones con la precisión y adecuación propias de un laboratorio.

Así, las dificultades pasan a ser función de medir las variables de interés y confirmar que las condiciones de flujo elegidas coincidan con las del objeto en su condición de operación real,

en especial si se trata de un modelo a escala o parcial. El perfil de velocidades, la distribución de presiones, las características de la capa límite y el grado de turbulencia, son algunas variables de influencia.

Esta cantidad de variables, y en especial el uso de modelos a escala para hacer los cuerpos manejables según las dimensiones del túnel y la capacidad de sus instrumentos, puede llevar a eventuales imprecisiones. Por ello, en el proceso de diseño de experimentos en un túnel de viento, son imperativas cuatro componentes en el personal participante: convicción de la necesidad de la prueba, experiencia en el campo de aplicación particular, conocimiento fundamental de análisis dimensional; y una buena dosis de intuición técnica.

Desde luego, la construcción de un túnel de viento no sólo implica factores de orden técnico, sino también requiere que, tanto diseñadores como usuarios, conozcan a cabalidad la ciencia de la mecánica de los fluidos, en particular la caracterización de flujos y el comportamiento de la capa límite. Por último, los usuarios deben tener conocimientos técnicos de su campo en particular y prepararse para interactuar con los objetivos (en ocasiones encontrados) de los operadores del equipo y de los constructores de modelos para que la experimentación sea provechosa.

Esta interacción entre campos de interés, necesariamente supone la dimensión humana. El proceso de diseño y construcción no puede omitir esta particularidad; al contrario, debe apoyarla en la medida en que estimula el pensamiento técnico independiente, la iniciativa calculada del inventor y, sobre todo, la creatividad en las soluciones de problemas de ingeniería.

2. UTILIZACIÓN DEL TÚNEL PROPUESTO

Uno de los aspectos más preocupantes al emprender un proyecto de construcción de esta índole, tanto por la inversión inicial como por el espacio físico requerido (más de 200 m² [2000 ft²] de bodega techada) y por efectos de su operación

(niveles de ruido muy altos de la pareja de ventiladores axiales de 30 kW [40 hp] cada uno), es el potencial factor de uso del túnel.

Se consideró inaceptable el hecho de que -quizás por un excesivo entusiasmo inicial- transcurriesen unos años con un alto factor de uso, y gradualmente los investigadores dirigieran su atención a otras áreas de interés, y con ello, que el túnel se usara únicamente para demostraciones o, en el peor de los casos, cayera en desuso.

Un túnel de viento apropiado para efectos didácticos o de demostración sería muy pequeño: una sección de trabajo no mayor a 0,07 m² [~1 ft²] con un ventilador de no más de unos 7,5 kW [10 hp] de potencia para lograr velocidades cercanas a los 40 m/s [7900 ft/min]. Un túnel de tales dimensiones no sería apropiado para investigación, dadas las limitaciones de precisión en las mediciones y requeriría factores de escala mayores para los modelos, lo que hace difícil o muy costosa su construcción, con precisión suficiente. El diseño y construcción de un túnel de viento con estas características se completó en julio de 2005; Rivera (2005) describe el proceso de construcción de este equipo en particular, instalado en el Laboratorio de Hidráulica de la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica.

Sin embargo, tras analizar muestras de los horarios de uso de túneles de viento de similar tamaño y prestaciones en otras universidades ², y conocer el tipo de servicios que ofrecen a entes externos, se concluyó que aun en el entorno universitario y técnico de Costa Rica, el factor de uso, a mediano plazo, sería suficientemente alto como para que los beneficios fueran significativos.

Las actividades por desarrollarse en torno a un equipo de esta clase se pueden distribuir en las de índole didáctica, las de investigación y desarrollo, y las de servicio a la comunidad. En los siguientes Cuadros 1, 2 y 3, se resumen las principales propuestas de acuerdo con las necesidades detectadas en el país en cada una de las áreas mencionadas.

Este tipo de experiencias se repetiría con una frecuencia de al menos dos veces al año, presumiendo que se trabajase con un único curso de un solo grupo de alumnos. Sin embargo, la matrícula semestral de alumnos que cursan las múltiples materias relacionadas con el tema de Mecánica de Fluidos en la Facultad es tal que sería necesaria una frecuencia mucho mayor de este tipo de pruebas, por el orden de treinta o cuarenta pruebas organizadas por cada curso lectivo regular.

El área de investigación es mucho más amplia, pero depende casi exclusivamente del interés y la preparación de los investigadores en los temas de los que se hace un resumen en el Cuadro 2. Por tanto, no hay seguridad de que exista un continuo de actividad en cada uno de dichos temas.

El servicio a la comunidad, en ocasiones podrá consistir en algún aspecto relacionado con los temas de investigación recién presentados, aunque es más probable que las solicitudes se den dentro de las categorías de problemas típicos de mecánica de fluidos que se presentan al ingeniero practicante. En el Cuadro 3 se resume el potencial

en este aspecto, haciendo la salvedad de que en muchos casos quienes se encuentran a cargo de la solución de tales problemas, no conocen la utilidad de las pruebas en el túnel de viento, principalmente porque lo tienden a relacionar exclusivamente con la industria aeronáutica. Dicha lista se ha conformado de acuerdo con los servicios más comunes que prestan túneles de viento privados y a las listas públicas de actividades que se muestran en los horarios de operación de túneles de viento pertenecientes a la Asociación de Pruebas Aerodinámicas Subsónicas (Subsonic Aerodynamic Testing Association, o SATA, 2005) .

Las listas presentadas no son exhaustivas, si se tiene en cuenta que se trata de campos tan imprevisibles y cambiantes como son los temas de investigación y las necesidades de la comunidad. Se muestran con la idea de ofrecer una perspectiva de la amplia aplicabilidad de un túnel de viento de baja velocidad.

Seguidamente se presentan las características técnicas de un túnel que cumpla con las características de velocidad y tamaño propuestos,

Cuadro 1. Experimentos didácticos.

Tema	Descripción
Reacciones en objetos	<ul style="list-style-type: none"> • Observación de perfiles de flujo y medición de fuerzas sobre objetos diversos (cilindros, placas, bolas, perfiles aerodinámicos, estructuras civiles, automóviles y otros)
Dinámica de un fluido	<ul style="list-style-type: none"> • Observación de frecuencias de oscilación, inestabilidades de flujo, formación de vórtices o áreas estancadas • Estudio del desarrollo de la capa límite
Turbomaquinaria	<ul style="list-style-type: none"> • Operación de generadores eólicos • Operación de ventiladores axiales o mixtos • Enfriamiento por convección
Análisis dimensional	<ul style="list-style-type: none"> • Correcciones por factor de escala • Modelos parciales o de escala desigual • Casos con transferencia de masa y calor
Procedimientos de calibración	<ul style="list-style-type: none"> • Adecuación del perfil de flujo • Correcciones por capa límite no similar • Correcciones por turbulencia • Origen de histéresis en las mediciones

Fuente: (El autor).

Basado en los ejes temáticos de los cursos de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Costa Rica.

las cuales, en buena medida, limitan el tipo de experimentación que se puede llevar a cabo, con suficiente confianza en las mediciones.

Cuadro 2. Áreas de investigación y desarrollo

Área	Temas específicos
Mecánica de fluidos	<ul style="list-style-type: none"> • Caracterización de casos particulares de flujo (perfiles aerodinámicos novedosos, objetos de forma arbitraria sometidos a un flujo) • Cuantificación de coeficientes de carga dinámica sobre objetos atípicos (intercambiadores de calor, motores, automóviles, rótulos giratorios)
Transferencia de calor y masa	<ul style="list-style-type: none"> • Desarrollo de correlaciones: coeficientes de convección • Caracterización de procesos de secado y evaporación • Caracterización de difusión de gases en el viento • Caracterización de patrones de erosión de terrenos
Cargas en estructuras civiles	<ul style="list-style-type: none"> • Cargas dinámicas sobre construcciones • Frecuencias naturales de construcciones • Vibraciones sobre construcciones
Turbomaquinaria	<ul style="list-style-type: none"> • Caracterización de álabes para ventiladores, bombas y hélices • Caracterización de generadores eólicos o ventiladores • Estudio de falla mecánica de rodetes
Diseño arquitectónico	<ul style="list-style-type: none"> • Sistemas de ventilación natural • Pronóstico de características acústicas • Estudios de vibraciones inducidas por viento • Susceptibilidad a propagación de incendios o gases

Fuente: (El autor).

Basado en los ejes temáticos de los cursos de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Costa Rica.

Cuadro 3. Servicios a la comunidad técnica.

Tema	Descripción
Ventilación de edificios	<ul style="list-style-type: none"> • Comprobación de sistemas de ventilación natural • Simulación de difusión de contaminantes en el interior de edificios • Diagnóstico de dificultades de operación de sistemas de aire acondicionado o extracción
Sistemas contra incendios	<ul style="list-style-type: none"> • Simulación de propagación de incendios en edificios. • Simulación de avance de incendios en campo abierto o en conglomerados de edificios.
Contaminación	<ul style="list-style-type: none"> • Simulación de difusión y propagación de contaminantes gaseosos o suspendidos.
Comportamiento de estructuras	<ul style="list-style-type: none"> • Análisis acústico • Frecuencias naturales de vibración • Predicción de cargas dinámicas por viento • Determinación de zonas de alta velocidad de flujo • Determinación de zonas de flujo estancado

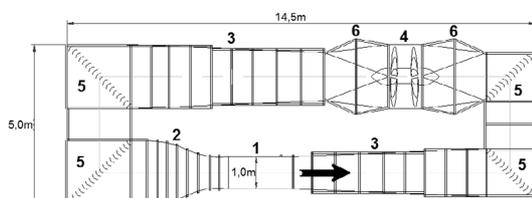
Fuente: (El autor).

Basado en aplicaciones típicas descritas por los miembros de SATA.

3. CARACTERIZACIÓN TÉCNICA

Hasta aquí, se han mencionado características particulares en cuanto a la operación y dimensiones del equipo. Esta sección describe los elementos indispensables para la combinación de velocidad y calidad de flujo deseables para una sección de trabajo con un área transversal de 1m^2 .

La siguiente ilustración es una vista en planta típica de la ductería necesaria, con los principales elementos dimensionados, en proporción al área de la sección de trabajo, de acuerdo con los criterios de selección y soporte de ductos según ASHRAE (1997) y a las recomendaciones de Barlow, Rae & Pope (1999), Mehta & Bradshaw, (1979) y Brassard (2003). Nótese el tamaño relativamente pequeño de la sección de pruebas con respecto al resto del sistema. Como ocurre en la mayoría de las instalaciones de este tamaño, se trata de un circuito cerrado para evitar la interferencia externa en la velocidad y estabilidad del flujo.



1. Sección de pruebas
2. Contracción
3. Difusores
4. Ventiladores
5. Esquinas
6. Transiciones

Figura 1. Diagrama de configuración (vista en planta)

Fuente: (El autor).

La *sección de pruebas* es la razón de ser del sistema. El flujo de entrada es uniforme gracias al diseño cuidadoso de la contracción; la capa límite sobre las paredes es muy delgada y crece poco en ese tramo. Consiste en un ducto cuadrado de 2 m

de longitud y una sección transversal cuadrada de 1 m de lado; sus paredes tienen un ligero ángulo de expansión ($\sim 1,5^\circ$, según Barlow, Rae & Pope (1999)) para compensar las pérdidas de presión y atenuar el aumento del espesor de la capa límite. En esa zona se ubica toda la instrumentación: los soportes para el modelo, el equipo para medición de fuerzas, los momentos de torsión, la presión y velocidad, así como el control de velocidad de los abanicos.

Esta sección de pruebas es fácilmente desmontable para permitir el uso de secciones de diferentes dimensiones, como ocurre cuando se tienen objetos muy esbeltos o cuando se procuran experimentos con velocidades de hasta 60 m/s [12000 ft/min] con la condición de una sección de dimensiones menores y una menor calidad de flujo.

La *contracción* es una zona crítica, por cuanto condiciona tres características fundamentales del flujo en la sección de pruebas: la uniformidad del perfil de velocidades, el grado de turbulencia y el espesor inicial de la capa límite (Katz, 2001). En términos generales, la contracción debe ser suficiente para acelerar el flujo a la velocidad deseada y para adelgazar al máximo la capa límite en las paredes a la entrada de la sección de pruebas en todo el ámbito de velocidades de operación.

La boca de la contracción ha de ser lo más grande posible para garantizar un flujo uniforme, y su geometría (en este caso, el perfil es un polinomio de grado tres) tiene la intención de eliminar cualquier cambio brusco de dirección que introduzca zonas turbulentas indeseables.

La contracción de una relación de áreas de 10:1 es muy segura para aplicaciones de baja velocidad, y no supone tantas dificultades constructivas típicas de relaciones de áreas mayores, que además se vuelven muy costosas. Por tratarse de una configuración de recirculación, con abanicos y codos que distorsionan el flujo, en la entrada de la contracción sería necesario un corto tramo que contenga entre cinco y diez mallas de alambre, espaciadas uniformemente, para mitigar cualquier heterogeneidad.

Los *ventiladores* son los componentes que siguen en el orden habitual de diseño; en este caso, por el alto volumen de flujo de 30 m³/s [65000 ft³/min] y un diferencial de presión relativamente alto de 1 kPa [4 in H₂O], una configuración interesante consiste en dos abanicos de flujo axial operando en serie. Cada uno sería impulsado directamente con un motor eléctrico de corriente alterna de 30 kW [40 hp] operando a una velocidad de 750 rpm.

Es aconsejable emplear un solo abanico, pero el diferencial de presión es suficientemente alto como para requerir álabes de compleja fabricación y de mayor nivel de ruido. Además, el flujo de salida tendría un sesgo en la dirección de rotación de la hélice, lo cual requeriría una cámara de asentamiento y rectificación adicionales. Por el contrario, dos abanicos rotando en direcciones opuestas anulan tal efecto (Eck, 1973) y permiten que los motores sean instalados en línea, lo cual implica una menor área obstruida para el flujo. Por último, cada uno de estos abanicos requiere suplir la mitad de la pérdida de presión, por lo que su costo global es menor, dado que los álabes son más simples y menos ruidosos. También conviene tener en cuenta que un abanico de mayor diámetro, es menos ruidoso.

El *difusor* desempeña una tarea inversa a la contracción; se trata de ajustar las dimensiones de la salida de la sección de prueba a las

dimensiones de la entrada a los abanicos. Sin embargo, en este tramo la calidad del flujo no es tan importante como conservar la energía del flujo en la medida en que sea posible, para minimizar la carga sobre los abanicos. El ángulo de apertura del tramo difusor es de 2,5° para evitar, a las velocidades más altas esperadas, separaciones de la capa límite (Barlow, 1999); su longitud se calcula de acuerdo con las dimensiones de la entrada a los abanicos.

Las *esquinas* tienen como función desviar el flujo con la mínima interferencia posible a la calidad del flujo; los codos con álabes guía son ideales en este sentido, puesto que ocupan muy poco espacio y la pérdida de presión es mucho menor a la de cualquier otra forma de cambiar la dirección de flujo (ASHRAE, 1997).

Algo similar ocurre con las transiciones, que transforman con una pérdida mínima de presión la sección cuadrada del ducto al tramo, necesariamente circular, en donde se encuentran los abanicos. Por la facilidad de trabajo sobre los modelos de edificios y para aprovechar al máximo el área útil, se prefiere una sección de pruebas cuadrada; el resto de la ductería se prefiere cuadrada, dado su menor costo.

Entre los componentes más costosos, hasta el momento, únicamente se han mencionado los motores y los ventiladores; sin embargo, la mayor inversión reside en la instrumentación necesaria.

Cuadro 4. Instrumentación típica para un túnel de viento subsónico

Instrumento	Funciones
Balanza	<ul style="list-style-type: none"> • Medición de fuerza⁴ en tres ejes • Medición de torsión en dos ejes
Centro de control	<ul style="list-style-type: none"> • Controlar la velocidad de flujo • Protección de los motores • Protección de los ventiladores • Seguridad de las instalaciones
Caracterizador de flujo	<ul style="list-style-type: none"> • Medición de velocidades • Medición de presiones • Medición de turbulencia • Observación directa de líneas de flujo

Fuentes: Barlow & Pope (1999) y Ower & Pankhurst (1977).

En el Cuadro 4 se muestra la instrumentación indispensable para los usos previstos del túnel

Algunos de estos equipos son de sencilla construcción y requieren, en algunos de los casos, el ensamble de componentes electrónicos de fácil adquisición. Tanto Ower & Pankhurst (1977) como Pallás (2001) recomiendan la construcción de equipos a la medida de la aplicación, siempre que se disponga de procedimientos y patrones de calibración apropiados para las funciones de los instrumentos.

Los costos más altos provienen de la balanza y el sistema de variación de velocidad. La balanza es el sistema de medición de fuerzas de cinco grados de libertad, que mide cinco de los seis posibles componentes de fuerza o momento torsionante que resultan sobre un cuerpo en el espacio tridimensional. Usualmente, estas balanzas se basan en el concepto de que cada fuerza provoca una deformación sobre el soporte del modelo; dichas deformaciones se determinan típicamente a través de galgas de deformación («strain gauges») y permiten una lectura rápida y precisa de datos proporcionales a la fuerza de interés.

El modo de variación de velocidad de flujo debe ser capaz de regular la velocidad con precisión y consistencia, sin fluctuaciones ni inestabilidades que disminuyen la calidad del flujo en la sección de trabajo. Dado el tamaño de los motores, sin duda tendrían que ser de corriente alterna, lo que prácticamente fuerza el uso de variadores de frecuencia⁵. El uso de un variador de frecuencia permite variar la velocidad de los motores de corriente alterna entre el 10 % y el 110 % de su velocidad nominal sin provocarle daños; dicha variación es necesaria para controlar la velocidad de flujo en la sección de pruebas de acuerdo a las necesidades del experimentador. Otras formas de control de flujo (estrangulamiento del flujo a la salida del ventilador, por ejemplo) desperdician buena parte de la energía de entrada a los motores y se corre el riesgo de que el flujo se vuelva en exceso inestable para la precisión esperada de las mediciones. Por otra parte, una alta proporción de los variadores modernos se ha diseñado para conectarse a un sistema de control

remoto a través de un computador, lo que lo habilita para que forme parte de un circuito de control retroalimentado y contribuye en forma significativa a la estabilidad del flujo y a la seguridad del equipo.

Ante el alto costo de este sistema, también se analizó la posibilidad de utilizar un ventilador axial de paso variable. Sin embargo, el aceptar inconvenientes como el complejo mecanismo variador del paso de la hélice y la posibilidad mayor de que se diera una falla mecánica catastrófica, no se comparaba con el impacto reducido en el costo del sistema.

4. LOS DESAFÍOS HUMANOS

En cualquier proceso de diseño se ve reflejado, por partes iguales, el grado de conocimiento técnico y la cultura de quienes han intervenido en él; lo mismo se puede decir de los constructores, que pueden preferir un tipo de solución técnica a otra, por cuestiones de estilo o de estética. En la mayoría de los casos, esto no interfiere con los objetivos de un trabajo; sin embargo, cuando ciertos mitos se han arraigado profundamente en la cultura técnica de un área del conocimiento, se toman decisiones que aparentan ser prácticas, pero en realidad atentan contra el verdadero crecimiento del sector. En esta sección se comentan los principales cuestionamientos de tipo humano que se le han planteado a los proponentes de este proyecto y que afectarían su ejecución.

Por una parte, uno de los preceptos de la ingeniería competitiva es cuidarse de reinventar la rueda. Sin duda, no tiene sentido desperdiciar tiempo valioso y recursos económicos en el ciclo de diseño y producción, pero antes, hay que comprobar si no se estarán perdiendo por ello oportunidades futuras o la autonomía intelectual que caracteriza a una institución académica.

Un caso clarísimo es la fe ciega que se tiene en el producto extranjero, en particular en el caso de maquinaria industrial; en muchos casos, la procedencia casi es garantía de calidad, por

pertenecer a una cultura con un particular estilo de trabajo, como ocurre con la excelente fama de la que gozan los productos alemanes. En otras, la trayectoria de la empresa que respalda la máquina es tal, que la experiencia asociada sin duda garantiza la calidad del producto, tal y como ocurre con las unidades de aire acondicionado Carrier. Sin embargo, el precio de dichos productos desarrollados y construidos en países del primer mundo es alto, no solo por el costo mayor de la mano de obra, sino por alto el costo de capital: el capital de inversión necesario para investigación, desarrollado en condiciones de primer mundo.

No debemos renunciar a la confianza en lo que producen quienes tienen la formación o experiencia que acrediten su fiabilidad. Lo inaceptable es rechazar a priori toda propuesta de diseño y construcción de una máquina, aun cuando su costo sea inferior y las garantías legales comparables. Cualquier ingeniero principiante ha experimentado casos en los que el empirismo mal orientado ha prevalecido sobre un criterio técnico riguroso, a pesar de existir evidencia suficiente para realizar determinada decisión ingenieril.

Otro punto polémico a la hora de intentar ejecutar proyectos de esta categoría es que el potencial cliente, los constructores y los propios diseñadores, le temen al hecho de que no exista una vasta experiencia previa al respecto. Los clientes en potencia rechazan la oferta, los constructores se niegan a arriesgar su capital, y los diseñadores carecen de iniciativa. El que un diseñador o constructor tenga experiencia es ideal, pero el hecho de carecer de ella, no es justificación para no iniciar camino o desconfiar de todo el proceso.

En los casos en los que es imperativo, por razones de tiempo, de costo o porque el área es un nicho cerrado, puede ser conveniente la adquisición de un equipo a manera de caja negra. Hay numerosas empresas extranjeras dedicadas a construir y vender, como paquetes, túneles de viento didácticos. Su costo es alto no sólo porque responden a los costos de componentes y mano de obra de países muy industrializados, sino porque en la mayoría de los casos, estos fabricantes se encuentran en el negocio porque pueden darse el

lujo de sobrepreciar sus productos: sus clientes preferidos son universidades con situación financiera holgada, lo que no es el caso de la Universidad de Costa Rica.

Esta es una razón más para que resulte inaceptable que instituciones abocadas a una labor tan importante como la formación de conocedores, dediquen sus limitados recursos a compras de equipos con sobreprecio, destinados a clientes con una realidad financiera totalmente distinta. Considerando que profesores y/o investigadores pueden formar un sólido equipo, aunque poco experimentado, para diseñar equipos de laboratorio relativamente simples, lo único que en verdad hace falta en nuestro entorno es un poco de iniciativa. Cuando menos, una buena dosis de afán por la aventura de crear algo autóctono, aunque no sea novedoso en otros entornos.

El concepto de transferencia tecnológica se ha vuelto un eufemismo para seguir importando maquinaria diseñada con la experiencia de otros, en lugar de estar haciendo experiencia y trayectoria propias. El ideal de la tecnología apropiada es noble, pero en ocasiones se basa en transferir la tecnología apropiada para el entorno y adaptarla a necesidades particulares. Sin embargo, el verdadero ideal es el trabajo independiente para que, en caso de necesidad y con suficiente tiempo, surjan ideas innovadoras.

Es cierto, no hay que reinventar la rueda; pero quizás valga la pena reinventar la llanta, para saber exactamente cómo funciona, cómo fabricarla, cómo venderla y, por ende, llevar a una evolución de la inventiva que se alimenta de la transferencia de tecnología, pero no depende de ella. Para ser apropiada, la tecnología debe ser generada precisamente por quienes la ocupan; su respaldo es el conocimiento, no las donaciones de cajas negras.

5. CONCLUSIONES

El diseño de un equipo que se usará para llevar a cabo experimentos supone un doble riesgo; por una parte, debe ser seguro, confiable y económico como cualquier otra máquina, y por

otra parte, debe producir un entorno experimental de calidad: debe generar un fenómeno medible adecuado.

Ante esta perspectiva, lo ideal es contar con conocimiento, experiencia, adecuado financiamiento, constructores comprometidos con su obra y un equipo de trabajo entusiasta y dedicado. Sin embargo, el hecho de que se den solo algunas de estas condiciones, o de que el entorno humano amplifique algunos aspectos de menor peso, no debe apagar la iniciativa del inventor genuino; más bien la historia ha confirmado repetidamente que la adversidad afila el ingenio.

Como parte de una cultura, la tecnología debe ser, precisamente, ideada por sus individuos. El contacto entre dos o más culturas en la mayoría de los casos puede ser provechosa, y el intercambio de conocimiento estimula la creatividad y la innovación desde más ángulos. Sin embargo, el proceso creativo, la experimentación y los riesgos, son pasos que no pueden faltar en una sociedad que busca generar conocimiento por encima de adaptarse para sobrevivir.

Quizás el inventor sea más un idealista que un visionario; pero en la medida en que su arte o su técnica sean legítimas, los verdaderos beneficios se verán únicamente con el tiempo, universal perspectiva.

NOTAS.

1. El análisis dimensional es un tema medular para cualquier experimento que se lleve a cabo en un túnel de viento (Murphy, 1950), pero no interviene en el dimensionado del equipo cuando se trata de túneles multipropósito puesto que no hay una única aplicación específica. Al respecto, la máxima de los constructores experimentados es que «la sección transversal del túnel deberá ser tan grande como lo permita el presupuesto» (Barlow, Rae & Pope, 1999).
2. Universidad de British Columbia, Canadá; Instituto Tecnológico de Helsinki, Finlandia;

Instituto Tecnológico de Massachussets, Estados Unidos, entre otras.

3. Los sitios de Internet de donde se extrajo esta información no se cita entre las referencias bibliográficas en vista de que no se trata de información de carácter científico (como lo sería un artículo u otra publicación en línea) y de que en todo caso a través del sitio de la SATA (que sí se incluyó entre las referencias por ser un excelente portal de información práctica, pero no técnica) se puede acceder a dicha información.
4. No se trata simplemente de un juego de dinamómetros; la velocidad de muestreo y la reactividad de los sensores determina la factibilidad de medir fuerzas o momentos de torsión que actúan a frecuencias medias y altas, lo que es fundamental para el estudio de ciertos fenómenos de mecánica de fluidos.
5. Cualquier otro modo de variación de velocidad se vuelve peligroso por la cantidad de calor que se genera en los motores o en los elementos de control impráctico por no permitir una variación continua y estable de las velocidades de rotación de los motores. Se puede encontrar una discusión concisa al respecto en Chapman (1993)

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- American Society of Heating, Refrigerating, and Air-conditioning Engineers (ASHRAE). (1997). 1997 ASHRAE Fundamentals. Atlanta: ASHRAE Press.
- Barlow, Rae & Pope (1999). Low-speed wind tunnel testing. (3a ed.). New York: Wiley Interscience.
- Brassard, D. (2003, feb.). Transformation of a polynomial for a contraction wall profile. En: Research project proposals annual fair at Lakehead University. Ontario, Canada.
- Chapman, S. J. (1993). Máquinas eléctricas. (2ª ed.). Bogotá: McGraw-Hill.

- Eck, B. (1973). Fans: design and operation. (6^a ed.) Oxford: Pergamon Press.
- Katz, J. & Plotkin, A. (2001). Low-speed aerodynamics. (2^a ed.). Cambridge: Cambridge University Press.
- Mehta, R. D. & Bradshaw, P. (1979). Design rules for low speed wind tunnels. Aeronautical Journal, (Royal Aeronautical Society). Vol. 73, p. 443.
- Murphy, G. (1950). Similitude in engineering. New York: The Ronald Press Company.
- Ower, E. & Pankhurst, R. C. (1977). The measurement of airflow. (5^a ed.). Oxford: Pergamon Press.
- Pallás, R. (2001). Sensores y acondicionadores de señal. México, D. F.: Alfaomega Grupo Editor.
- Rivera, R. (2005). Diseño y construcción de un túnel de viento para la Facultad de

Ingeniería. Tesis de Licenciatura, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.

REFERENCIAS EN INTERNET

Subsonic Aerodynamic Testing Association (SATA). (2005). Testing Facilities by Company. Extraído durante noviembre de 2005 de www.sata.aero.

SOBRE EL AUTOR

Juan Gabriel Monge Gapper

Magíster en Ingeniería Mecánica. Profesor de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Costa Rica.

Teléfono: 207-5696

Facsímil: 207-5610

Apartado postal: 10609-1000. San José, Costa Rica.

Correo electrónico: gmonge@fing.ucr.ac.cr