

LA CALIBRACIÓN ANEMOMÉTRICA PARA EL RECURSO EÓLICO

Fernando Flores Murrieta, Omar Yam Gamboa, Jaime Cuevas Domínguez, Roberto Acosta Olea

Universidad de Quintana Roo. Blvd.. Bahía s/n, esq. I. Comonfort. Col. Del Bosque. Chetumal, Q. Roo. C. P. 77019

e-mail: feflores@uqroo.mx

Guilbaldo Tolentino Eslava, René Tolentino Eslava

Laboratorio de Ingeniería Térmica e Hidráulica Aplicada. Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica – Sección de Estudios de Posgrado e Investigación – Instituto Politécnico Nacional. Edificio 5, 3er piso. U. Profesional Adolfo López Mateos “Zacatenco”, Col. Lindavista. México D. F. C. P. 07738

RESUMEN

En este trabajo se presenta la metodología para la calibración de anemómetros de rotación de acuerdo a la norma Británica BS-1042. La metodología consiste en la caracterización del equipo de calibración; medición de las velocidades con un instrumento patrón y relacionarlas con las del anemómetro para determinar el factor de calibración correspondiente y el porcentaje de error de dicho instrumento.

Palabras clave: Anemómetro de rotación-Perfil de velocidad-Tubo de Pitot-Túnel de viento.

ANTECEDENTES

El viento es aire en movimiento, generado por diferencias de temperatura que existen en la superficie terrestre. Los océanos y otras grandes masas de agua se calientan y se enfrían con diferentes velocidades en comparación con las grandes masas de tierra. Esto causa unas diferencias en la presión (gradientes), por tanto, el aire se mueve de áreas de alta presión hacia áreas de baja presión, lo cual crea el viento. A cualquier proceso relacionado con el viento se le denomina “Eólico” (Eolo, el Dios del viento de la mitología griega) (eólica, wikipedia).

La energía eólica se considera una forma indirecta de energía solar. Entre el 1 y 2% de la energía proveniente del sol se convierte en viento. La energía cinética del viento puede transformarse en energía útil, tanto mecánica como eléctrica. Transformada en energía mecánica ha sido históricamente aprovechada, pero su uso para la generación de energía eléctrica es más reciente, existiendo aplicaciones de mayor escala desde mediados de la década del 70 en respuesta a la crisis del petróleo y a los impactos ambientales derivados del uso de combustibles fósiles. Una de las características de este recurso es su condición aleatoria y variable, por cuanto depende de condiciones

atmosféricas. Esto lleva a que se requieran exhaustivas mediciones mediante estaciones meteorológicas confiables como condición previa para el desarrollo de proyectos destinados a su aprovechamiento.

INTRODUCCIÓN

Cuando no se dispone de instrumental de medida de la velocidad del viento, la observación de sus efectos sobre los penachos de humo, vegetación, superficie del mar, etc. permite una estimación de la velocidad del viento, según la denominada escala Beaufort (Lord Francis Beaufort, almirante de principios del siglo XIX) (Le Gourieres 1983). Esta escala de medida empírica tiene un origen marino, fue adoptada por el almirantazgo británico en 1848 y aún se sigue utilizando (Villarrubia 2004).

En la actualidad las mediciones de viento se realizan mediante dispositivos (sensores) denominados anemómetros y se utilizan en áreas tales como los boletines meteorológicos, meteorología agraria, para propósitos industriales, para diferentes áreas de la ciencia ó específicamente como en el caso aquí tratado para la evaluación del recurso eólico. Todas estas aplicaciones tienen sus propias

condiciones, por tanto, necesitan una tecnología que las tenga en cuenta. Además, cualquiera de estos usos demanda una alta exactitud y precisión de las medidas, necesarias para pronosticar los beneficios generados. Incluso una pequeña desviación de los resultados, conduce a cálculos erróneos en la energía disponible del viento, ya que ésta es función cúbica de la velocidad (Cádiz 1984) y por lo tanto, aumentan el riesgo económico de la inversión (Ammonit 2000).

El registro de los datos se debe llevar a cabo al menos, 12 meses sin interrupciones, ya que a corto plazo, las pérdidas de los datos no son fáciles de manejar. La elección de los sensores y la instalación de los sistemas de medición, es fundamental para obtener medidas con la menor incertidumbre posible (Ammonit 2000).

Para la evaluación del recurso eólico los anemómetros más utilizados son los de rotación. Están constituidos por tres o cuatro cazoletas (copas o cangilones) que giran alrededor de un eje vertical por efecto del coeficiente de arrastre debido a la acción del viento. Las cazoletas tienen forma semiesférica o cónica. En algunos casos en lugar de cazoletas, los anemómetros incorporan hélices. Estos últimos giran en virtud del efecto del coeficiente de sustentación al presentar cierto perfil aerodinámico.

El anemómetro va dotado de un transductor que convierte la velocidad de giro del sensor (cazoletas) en una señal mecánica o eléctrica que permite su registro en banda de papel o bien directamente en soporte informático. Actualmente las estaciones automáticas de medida utilizan este segundo sistema. En estaciones autónomas, no conectadas directamente a una red de captación y tratamiento de información, los datos se capturan, se guardan en un registrador de datos (<<conocido como data logger en inglés>>) y periódicamente se recogen para su posterior tratamiento (Villarrubia 2004).

Dada la exposición de los sistemas de medición en ambientes corrosivos (sal y arena) y a elevados niveles de luz ultravioleta, por ejemplo, en las costas, los sensores de viento tienen periodos de mantenimiento y calibración determinados por el fabricante de acuerdo con su

uso y exposición, que en general no superan el periodo de 1 año (R. M. Young 2003).

Lo anterior, justifica la necesidad de superar los problemas por desajustes en la instrumentación dadas las inclemencias del tiempo y minimizar los errores en las mediciones de la velocidad del viento.

La calibración de anemómetros de rotación es el objetivo de este trabajo y se realiza en los denominados túneles aerodinámicos o simplemente túneles de viento. Por tanto, en estos últimos se debe desarrollar previamente la caracterización de los mismos a través de la determinación de los perfiles de velocidad, capa límite y turbulencia respectivamente. Esto permitirá cuantificar el margen de error en la instrumentación correspondiente y aplicar el factor de calibración correspondiente. Por las características propias de la instalación, se implementa una metodología de calibración adecuada. Para ello, se aplica la norma Británica BS-1042 (1983) para mediciones de flujo de fluidos en conductos cerrados. Método área velocidad mediante un tubo estático de Pitot.

Los resultados obtenidos se han implementado desde 2006 para dar apoyo al Proyecto: “Estimación del Potencial Solar y Eólico en las Costas de Quintana Roo”, desarrollado por integrantes del Cuerpo Académico de Ingeniería en Sistemas de Energía de la Universidad de Quintana Roo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Túnel de viento de baja velocidad

Se utilizó una instalación de túnel de viento de baja velocidad, el cual, consiste de un ventilador centrífugo, una sección de pruebas en la descarga del ventilador, un motor eléctrico y un variador de velocidad para controlar las revoluciones por minuto del motor y por tanto, la velocidad del flujo de aire. Se cuenta con una sección de prueba circular de 0.3 m de diámetro, en donde se hace pasar un flujo constante de aire con diferentes velocidades. Tiene una longitud de 3.90 m. En la sección de pruebas se realizan las calibraciones de instrumentos de medición de velocidad de aire. La zona de calibración se encuentra a 2.82 m de la descarga del ventilador

(9.5 diámetros) y 1.08 m antes del final de la sección de pruebas (3.5 diámetros). La zona de calibración cuenta con una mirilla de acrílico lateral y tiene dos perforaciones en la parte superior para introducir instrumentos de medición, tales como los tubos de Pitot (Cortés 2004). En la Figura 1(a) se muestra la instalación en donde se desarrolló la calibración del anemómetro de rotación. En la Figura 1(b) se muestran las especificaciones de la sección de pruebas.

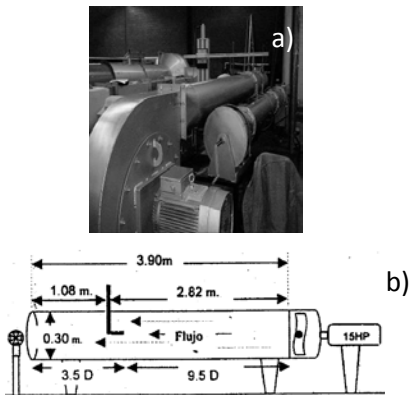


Figura 1. a) Túnel de viento y b) especificaciones de la sección de pruebas de viento.

INSTRUMENTACIÓN

Para realizar la calibración del anemómetro de rotación es necesario caracterizar la sección de pruebas del túnel de viento mediante los perfiles de velocidad empleando un tubo estático de Pitot de punta elíptica en la zona de pruebas, un tubo estático de Pitot de punta elíptica en la descarga (Cortés 2002), como el mostrado en la Figura 2a. Asimismo, se utilizó un manómetro inclinado, como el de la Figura 2b para determinar las presiones dinámicas y estáticas. Además, fue necesario determinar la densidad del aire midiendo la presión atmosférica y la temperatura ambiente, por lo que se utilizaron un barómetro anerode y un termo higrómetro respectivamente. Tales parámetros y el de humedad relativa del aire se midieron en la descarga.

Para desplazar el tubo de Pitot dentro de la zona de pruebas del túnel de viento para desarrollar las mediciones de las presiones se utilizó un sistema posicionador con movimiento en los 3 ejes mediante un motor de paso (Tolentino 2003). El posicionador se controla con una computadora mediante un software específico.

La Figura 3 muestra la imagen del posicionador con el respectivo tubo de Pitot dispuesto en la zona de calibración.

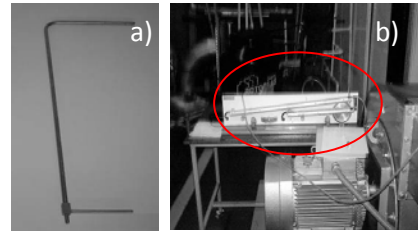


Figura 2 a) Tubo de Pitot con punta elíptica; Manómetro inclinado

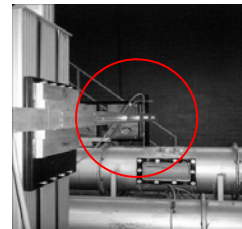


Figura 3. Brazo posicionador.

Anemómetro de rotación

El anemómetro de rotación a calibrar es del tipo “cazoletas”. Es el instrumento de medición estándar con mayor utilización. Sus 3 copas son de sección transversal cónica. Su bajo momento de inercia y el tipo de cojinetes (teflón) le permiten una rápida respuesta a las rachas de viento. Debido a su salida lineal, estos sensores son idóneos para sistemas electrónicos de adquisiciones de datos. Cuenta con 4 polos magnéticos que inducen una variación de voltaje de onda senoidal en una bobina que produce una señal de salida con una frecuencia proporcional a la velocidad de viento (Tolentino 2003). Las cazoletas son hechas de policarbonato. En la Figura 4a se ilustra este instrumento. En la Figura 4b se muestra su correspondiente sistema de adquisición de datos (data logger).



Figura 4. a) Anemómetro de cazoletas y b) sistema de adquisición de datos.

SopORTE para anemómetros

El soporte que sujeta el anemómetro de “copas” es una base de madera de pino sobre un poste metálico. A dicha base se le practicó un orificio (en el extremo ubicado en la descarga del ducto) en donde se inserta un tubo de plástico dentro del cual se dispone a presión una varilla en donde se inserta el anemómetro. La Figura 5 ilustra el esquema del soporte.

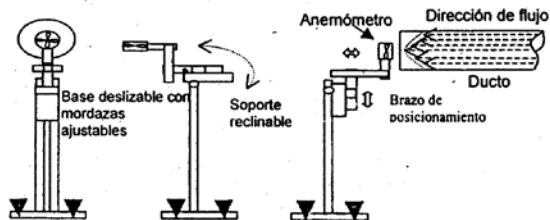


Figura 5. Soporte de anemómetros.

METODOLOGÍA DE CALIBRACIÓN

Para realizar la caracterización del túnel de viento y la calibración del anemómetro de rotación se realizó una matriz experimental que describe la metodología (Cortés 2004) a seguir en forma general y se divide en tres etapas, las cuales son:

1. Obtener los perfiles de velocidad en el túnel de viento, tanto en la zona de calibración como en la zona de pruebas (descarga del túnel).
2. Determinar los perfiles de velocidad en la zona de calibración, con bloqueo (C/B) y sin bloqueo (S/B). La primera condición (C/B) se efectuó con el anemómetro posicionado en el centro de la descarga del ducto. La segunda condición (S/B) se realizó tomando el perfil de velocidad sin el anemómetro de “copas” en la descarga de la sección de pruebas.
3. Calibrar el anemómetro de “copas” a las velocidades de 5, 10, 15 y 20 m/s. Esta calibración se efectúa haciendo la comparación de la velocidad obtenida con el tubo de Pitot sin bloqueo y la velocidad obtenida con el anemómetro de “copas” en la descarga del túnel de viento en cada velocidad mencionada.

En la Figura 6(a) se muestra la ubicación del tubo de Pitot para determinar los perfiles de velocidad en la zona de calibración y en la

descarga de la zona de pruebas del túnel de viento.

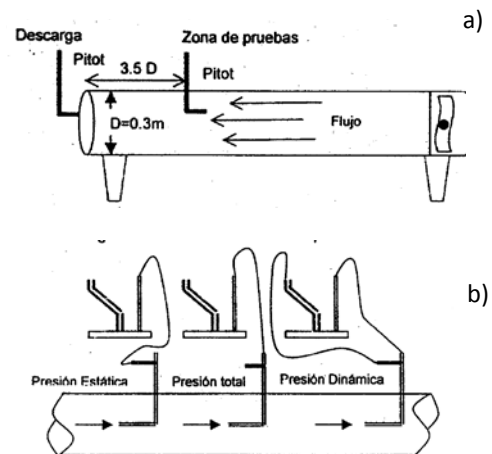


Figura 6. a) Posición del Tubo de Pitot en el túnel de viento; b) Conexión del tubo de Pitot para las presiones estática, total y dinámica.

Mediante la determinación de la presión dinámica promedio se obtiene la velocidad promedio (British Standard Institution, 1983). Con esta velocidad se lleva a cabo la calibración del anemómetro.

El siguiente paso es obtener el coeficiente de corrección K para las velocidades de calibración, este coeficiente se determina de la relación que existe entre la velocidad de referencia (medida con el tubo de Pitot) y la velocidad de prueba (medida con el anemómetro de copas).

Después, se obtiene la gráfica de velocidad de referencia (V_r) contra coeficiente de corrección (K). Esta gráfica se obtiene de los valores determinados del coeficiente K para las velocidades de calibración en el eje “Y” y la velocidad de referencia registrada con el tubo de Pitot en el eje “X”.

Con el factor K corregido se determina la velocidad del calibrando corregida (anemómetro de copas).

Finalmente se calcula el error relativo de la calibración. El error de calibración del anemómetro de copas se determina con la diferencia de la velocidad corregida del anemómetro y la velocidad de referencia del tubo de Pitot con respecto a la misma velocidad de referencia.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Como se mencionó anteriormente para la caracterización del túnel de viento se realizaron mediciones de presión dinámica en las zonas de calibración y en la descarga a las velocidades de 5, 10 15 y 20 m/s. Con las velocidades puntuales se obtuvieron los perfiles de velocidad que determinan el comportamiento del flujo en la zona de calibración y en la zona de descarga del túnel de viento (Flores 2005), tal como se muestra en las Figuras 7(a) y 7(b).

De acuerdo a la Figura 7(a), se observa que los perfiles de velocidad son uniformes en esta zona, ya que prácticamente no se presentan distorsiones en el centro. Se aprecia que las velocidades menores se dan en las orillas del ducto y las mayores al centro del mismo: Por esa razón se recomienda realizar un barrido de lecturas en varios puntos de la sección transversal del ducto.

En la gráfica de la figura 7(b) se observa que el perfil de velocidades es mas plano, esto es debido principalmente a que las lecturas de presión se realizan en donde ya no hay paredes de ducto que contengan al flujo de aire y en consecuencia la presión dinámica es más uniforme en cualquier punto medido.

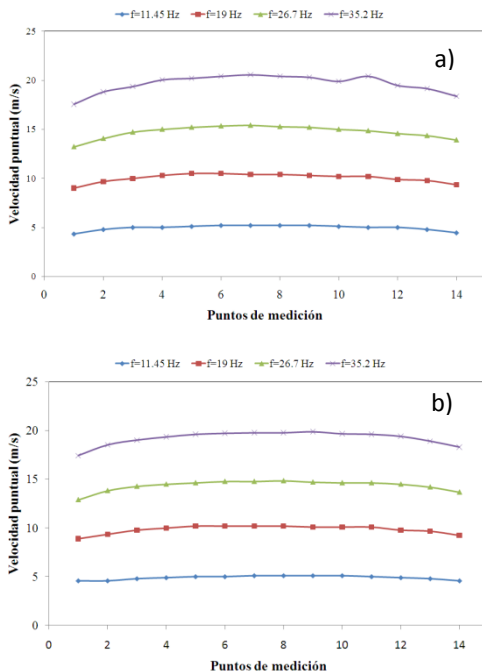


Figura 7. a) Perfil en zona de calibración; b) Perfil en zona de descarga.

CALIBRACIÓN DEL ANEMÓMETRO DE CAZOLETAS

La calibración del anemómetro de cazoletas se realizó a 5, 10, 15 y 20 m/s, siguiendo el procedimiento descrito previamente. Primero se determinaron las velocidades medias obtenidas con el tubo de Pitot sin bloqueo, con bloqueo (equivalente a V_r) y del propio anemómetro de copas (V_c). La Tabla 1 muestra estas velocidades correspondientes para 3 anemómetros del mismo tipo marcados como N° 1, N° 13 y N° 2 y de los cuales se obtuvo el factor K de calibración.

Tabla 1. Velocidades de referencia y del calibrando y factor de calibración (Flores 2005).

Nº	Pd int SB (Pa)	Pd int CB (Pa) corr.	V _m Pitot SB (m/s)	V _m Pitot CB (m/s)	V _m anem.1 (m/s)	K=V _r /V _c
1	13,00	12,50	5,21	5,11	5,52	0,93
2	52,50	52,00	10,47	10,42	10,87	0,96
3	114,00	113,00	15,42	15,35	15,84	0,97
4	203,00	202,00	20,58	20,53	21,20	0,97
Nº	Pd int SB (Pa)	Pd int CB (Pa) corr.	V _m Pitot SB (m/s)	V _m Pitot CB (m/s)	V _m anem. 3 (m/s)	K=V _r /V _c
1	13,00	13,00	5,21	5,21	5,52	0,94
2	54,00	52,50	10,61	10,47	10,87	0,96
3	114,00	112,00	15,42	15,29	15,84	0,96
4	203,00	202,00	20,58	20,53	21,39	0,96
Nº	Pd int SB (Pa)	Pd int CB (Pa) corr.	V _m Pitot SB (m/s)	V _m Pitot CB (m/s)	V _m anem. 2 (m/s)	K=V _r /V _c
1	13,00	12,50	5,21	5,11	5,52	0,93
2	53,00	52,00	10,51	10,42	10,87	0,96
3	114,00	112,00	15,42	15,29	16,03	0,95
4	205,00	203,00	20,68	20,58	21,39	0,96

Nota: SB=Sin Bloqueo; CB=Con Bloqueo

Utilizando los datos de la Tabla 1 se obtiene la gráfica que relaciona el factor K y la velocidad del patrón de referencia (V_r), tal como se muestra en la Figura 8. Asimismo, de la misma figura se determina la ecuación lineal del coeficiente K que depende de los cambios de velocidad de referencia. La gráfica de tendencia

lineal permite realizar la calibración del anemómetro de rotación, ya que para cada valor de velocidad le corresponde un valor del factor K corregido. En dicha figura se muestra la gráfica de tendencia lineal y su ecuación respectiva que nos da el factor de calibración corregido. El comportamiento es similar para los anemómetros 2 y 13.

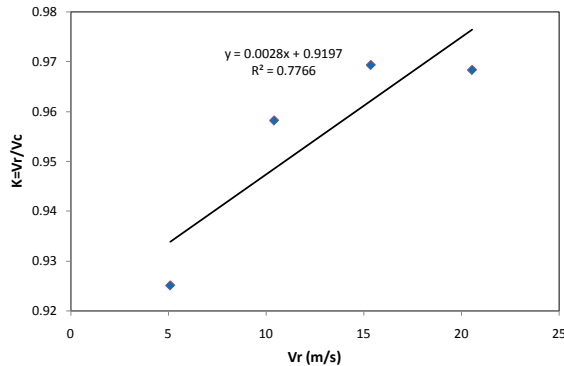


Figura 8. Relación del factor de corrección K vs. Velocidad de tubo Pitot y linealización de factor K para anemómetro 1.

Tabla 2 Resultados de la calibración de los anemómetros de copas (Flores 2005).

	Factor K corregido	Vel. Anemom. de copas	Error actual
No.	$K1=0,0028Vr+0,9197$	$(Vc)correg=K*Vc$ (m/s)	$((Vc)correg-Vr)/Vr$
1	0,934	5,156	0,010
2	0,949	10,314	-0,010
3	0,963	15,249	-0,007
4	0,977	20,716	0,009
No.	$K13=0,001Vr+0,9447$	$(Vc)correg=K*Vc$ (m/s)	$((Vc)correg-Vr)/Vr$
1	0,950	5,243	0,007
2	0,955	10,383	-0,008
3	0,960	15,206	-0,005
4	0,965	20,646	0,006
No.	$K2=0,0021Vr+0,9229$	$(Vc)correg=K*Vc$ (m/s)	$((Vc)correg-Vr)/Vr$
1	0,934	5,154	0,009
2	0,945	10,270	-0,014
3	0,955	15,309	0,002
4	0,966	20,665	0,004

En virtud de que en las gráficas de las Figuras 7(a) y 7(b) no hay distorsiones notables, es decir, las variaciones de velocidad son de aproximadamente más menos 10%, se da por aceptable el flujo para realizar una calibración.

También se deduce que la frecuencia es directamente proporcional a la velocidad. Por lo tanto, si se requiere de una velocidad intermedia entre 5 y 20 m/s diferente a las que se tomaron de referencia, la frecuencia de operación se determina mediante la gráfica de la Figura 9.

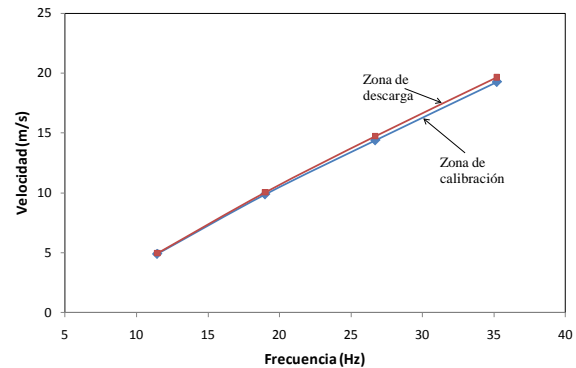


Figura 9. Comportamiento de la velocidad promedio y la frecuencia de operación.

La calibración de los anemómetros analizados se determina mediante las ecuaciones obtenidas de las gráficas de tendencia, en las cuales, la variación de la velocidad de referencia Vr es un factor determinante para calibrar únicamente en los rangos de medición realizados, es decir, únicamente para interpolar y no para extrapolar. La calibración de estos anemómetros origina un porcentaje de error que habrá de minimizarse para confiar en la misma calibración. Este error se puede originar a varios factores: número de mediciones tomadas; experiencia del personal que realiza mediciones; exactitud de la instrumentación; condiciones ambientales al momento de los experimentos, entre otros.

CONCLUSIONES

En el desarrollo de este trabajo la determinación de la velocidad del aire estuvo en función de las condiciones atmosféricas locales durante la experimentación.

Para una calibración adecuada es muy importante contar con una metodología para tener un seguimiento ordenado de las actividades inherentes a esta técnica. Asimismo, habrá de caracterizarse en primer término el túnel de viento en donde se realizarán las pruebas. Lo anterior es para la obtención de los perfiles de velocidad, los cuales deberán presentar

uniformidad y sin variaciones en la zona de calibración.

Se recomienda para trabajos de este tipo realizar un análisis de incertidumbre, ya que de esta manera se permitirá la determinación de los errores de calibración y desarrollar pruebas más exactas con un instrumento calibrado. Por otro lado, el trabajo aquí presentado se puede considerar como un manual de inducción, específicamente en el área de anemometría para estaciones climatológicas, ya que por contar con instrumentos expuestos a la intemperie, el desgaste de los mismos es prematuro y es evidente que se requerirá de calibraciones periódicas para disponer de bases de datos precisos y así evaluar por ejemplo, el recurso eólico en zonas potenciales.

AGRADECIMIENTOS

Para el desarrollo de este trabajo se agradece el apoyo otorgado por el PROMEP al Proyecto “Fortalecimiento del Cuerpo Académico de Ingeniería en Sistemas de Energía” y a la colaboración del Laboratorio de Ingeniería Térmica e Hidráulica Aplicada de la Sección de Estudios de Posgrado e Investigación de la ESIME – IPN.

REFERENCIAS

Ammonit Gesellschaft für Meßtechnik mbH. 2000 Medición de Viento para realizar un correcto pronóstico energético Berlín.

British Standards Institution. BS-1042.1983.: British Standards Measurement of Fluid Flow in Closed Conduits. Part 2, Velocity area Methods. Section 2.1 Method using Pitot Static Tubes.

Cádiz Deleito J. Carlos.”La Energía Eólica, Tecnología e Historia”. Editorial Hermann Blume. Madrid, 1984.

Cortés Mejía Gustavo. 2004. “Metodología Experimental para Calibrar Anemómetros Tipo Propela”. Tesis de Licenciatura. Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica – Instituto Politécnico Nacional. México D. F.

Flores Murrieta Fernando. 2005. “Calibración de anemómetros tipo copas”. Reporte Técnico.

Cuerpo de Académicos de Ingeniería en Sistemas de Energía. DCI-UQROO.

Energía eólica, wikipedia. http://es.wikipedia.org/wiki/Energ%C3%ADa_e%C3%B3lica.

Le Gourieres D. “Energía Eólica. Teoría, Concepción y Cálculo Práctico de las Instalaciones”. Editorial MASSON, S. A. Barcelona, 1983.

R. M. Young. 2003. Procedimiento de operación estándar. Calibración de monitores de viento. Modelos 05305AQ y 05301.

Tolentino Eslava René. 2003. “Medición de Capa Límite y Turbulencia en un Túnel de Viento para Calibración de Instrumentos de Medición de Velocidad”. Tesis de Maestría. Laboratorio de Ingeniería Térmica e Hidráulica Aplicada (LABINTHAP) – Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica – Sección de Estudios de Posgrado e Investigación - Instituto Politécnico Nacional. México D. F.

Villarubia Miguel. 2004. Energía Eólica. Editorial CEAC. España.