

ACTA DE LA XXXVIII REUNIÓN DE TRABAJO

**Volumen 3
Año 2015**

**Asociación Argentina de
Energías Renovables y Ambiente**



**Asociación Argentina de
Energías Renovables y Ambiente**

ACTA DE LA XXXVII REUNIÓN DE TRABAJO

Vol. 3 Año 2015
ISBN 978-987-29873-0-5
Secciones 1 a 12

COMISIÓN DE PUBLICACIONES

Cadena, Carlos; Franco, Judith;
Hernández, Alejandro; Saravia, Diego

Editores:

Abalone Rita - Acosta Delicia - Altobelli Fabiana
Barral, Jorge – Belmonte, Silvina - Bistoni, Silvia
Busso, Arturo - Cisterna Marta - Condorí Miguel
Echazú, Ricardo - Esteban Sonia - Fernández Llano J.
Franco Judith - Iriarte Adolfo – Ledesma Sara
Martínez Bogado Mónica - Mercado M V - Mesa Alejandro
Nota Viviana – Villena, Maiver

E-mail: eaverma@asades.unsa.edu.ar

ASADES

Asociación Argentina
de Energías Renovables y
Ambiente

COMISIÓN DIRECTIVA

Presidente: Carlos Cadena
Secretario: Alejandro Hernández
Tesorero: Judith Franco
Vocales: Carlos Discoli
Sara Lía Ledesma

COMISIÓN REVISORA DE CUENTAS

Arturo Busso
Irene Martini
Gustavo San Juan

DIRECCIÓN POSTAL ASADES

**INENCO (Instituto UNSa-
CONICET)**

Avda. Bolivia 5150
4400 - Salta, Argentina
Tel. 54-387-4255424
FAX: 54-387-4255489
E-mail: asades.org@gmail.com

COMISIÓN ORGANIZADORA XXXVIII

Reunión de Trabajo de la ASADES – San Rafael, Mendoza, 10 al 13 de Noviembre de 2015

Comisión organizadora: Héctor Carlos Broto, Horacio Paulino Pessano, Iván Barón, Luis Boccaccini, Lucas Pietrelli, Angel Quiles, Felipe Genovese, Edgardo Boschín, Roberto Vilches, Guillermo Guillén, Jimena Lloret, Analía Alvarez, Damián Zamora, Paula Pretel, Juan Pablo Boschín, Nicolás Torregrosa

EDICIÓN DIGITAL Y APOYO TECNICO

Beatriz L. Balderrama, Ricardo Caso, Raúl Cullell, Carlos A. Fernández, Hugo C. Suligoy

INENCO

COMISIÓN DE ARBITRAJE

Abalone, Rita	Acosta, Delicia	Adaro, Jorge	Ajmat, Raul F.
Aires, Marcelo	Albizatti, Enrique	Altamirano Martín	Altobelli, Fabiana
Alurralde, Martín	Arce, Roberto	Arena, Pablo	Aristegui, Rosana
Barea Paci, Gustavo	Barral, Jorge	Belmonte, Silvina	Bertinat, Pablo
Bistoni, Silvia	Blasco Lucas Irene	Bolsi, Claudio	Bucki Wasserman, B.
Bustamante, Waldo	Busso, Arturo	Cadena, Carlos	Cappelletti, Marcelo
Cardón, Luis	Caseres, Manuel	Caso, Ricardo	Carrica, Daniel
Cartegoso, José	Cataldo, José	Civit, Bárbara	Cisterna, Marta Susana
Condori, Miguel	Codina, María	Cossoli, Pedro	Correa, Erica
Cortes, Alberto	Cuitiño, Guadalupe	Cúnsulo, Mario	Cutrera, Miriam
Czajkowski, Jorge	De Paul, Irene	Dellicompagni, Pablo	Discoli, Carlos
Durán, Gonzalo	Durán, Julio Rubén	Durán, Rodrigo	Echazú, Ricardo
Esteban, Sonia	Esteves, Alfredo	Evans, John M.	Fasulo, Amilcar
Filippín, Celina	Firman, Andres	Flores Larsen, Silvana	Follari, Jorge
Franco, Judith	Fernández Llano, J.	Galvéz, David Morillon	García, Víctor
Garzón, Beatriz	Godfrin, Elena	González, Alejandro D.	González, Jorge Augusto
Gonzalo Guillermo	Galimberti, Pablo	Ganem, Carolina	Gato D' Andrea, M. L.
Gea, Marcelo	Gelardi Caviglia, D.	Gil, Gustavo	Gonzo, Elio
Hernández, Alejandro	Hoyos, Daniel	Iriarte, Adolfo	Iribarnegaray, Martín A.
Jacob, Susana	Javi, Verónica	Krenzinger, Arno	Kuchen, Ernesto
Kurban, Alejandra	Ledesma, Sara L.	Luque, Victor	Lema, Alba
Lesino, Graciela	Liberal, Viviana I.	Maldonado, Noemi	Manrique, Silvina
Martínez Bogado, M.	Martinez, Cecilia	Martini, Irene	Mercado, María Victoria
Mesa, Néstor A.	Medina, Mabel	Michalus, Juan Carlos	Mitchell, Jorge
Morillon Glavéz, David	Nota, Viviana	Odicino, Luis	Ogara, Mario
Oliva, Rafael Beltrán	Oliveira, Mario	Parente, Jorge R.	Pasculi, Mónica
Passamai, Víctor	Pedro, Graciela	Piacentini, Rubén	Piquard, Celmira
Pla, Juan	Placco, Cora	Pontin, Ma. Isabel	Quiroga, Mirta
Quiroga, Noelia	Raichjk, Carlos	Raggio, Daniel	Rampinelli, Giuliano
Righini, Raúl	Rodrigo, Víctor	Salazar, Germán	Salvo, Nahuel
San Juan, Gustavo	Sanziel, Cristina	Saracho, Marta	Saravia, Diego
Seghezzo, Lucas	Sogari, Noemí	Socolovsky, Hernán	Tamasi, Mariana
Taretto, Kurt	Tilca, Fernando	Toranzos, Victor	Vera, Luis
Videla, Mariela	Viegas, Graciela	Vilela, Olga	Villa, Luis
Vilte, Ma. Del S.	Watkins, Marcelo	Zitzer, Alejandro	Zizzias, Javier

MEDICIONES DE PRESIÓN MEDIA Y FLUCTUANTE EN TÚNEL DE VIENTO DE BAJA VELOCIDAD Y CÁLCULO DE FUERZAS AERODINÁMICAS DE UN PERFIL NREL S822.

B. Juan¹, J.O. Marighetti², J.M. Rodríguez Aguirre³, M. Aires⁴, M. De Bortoli⁵, J. Obregón⁶.
Laboratorio de Aerodinámica – Facultad de ingeniería – Universidad Nacional del Nordeste
Ingeniería Química – Facultad Regional Resistencia – Universidad Tecnológica Nacional
IMIT – Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)
Av. Las Heras 727. Resistencia, Chaco, Argentina CP: 3550
Tel. (+54) 362 4439039/4420076- Fax (+54) 362 44281066. E-mail: jomaringha@gmail.com

Recibido 07/09/15, aceptado 16/10/15

RESUMEN: En este trabajo, que forma parte del proyecto de estimación de potencial de recurso eólico de las provincias de Chaco, Formosa y Corrientes, se estudia un perfil normalizado para utilización en generadores eólicos seleccionado con el criterio de optimizar el recurso eólico disponible en sitios específicos; se realizan mediciones en túnel de viento de presiones medias y fluctuantes superficiales sobre un modelo rígido seccional reducido NREL S822, obteniéndose por integración, fuerzas de sustentación y arrastre para distintos ángulos de ataque. Se obtuvieron las curvas de los Coeficientes de sustentación y Arrastre para diversos ángulos de ataque con un Número de Reynolds de 5×10^5 , en tres líneas de tomas de presión ubicadas en todo el perímetro del perfil. Los resultados, comparados con los reportes de estudios experimentales de la NREL, muestran buen acuerdo en los coeficientes de sustentación, pero algo más altos en los valores de arrastre.

Palabras Clave: Túnel de viento, generadores eólicos, perfil alar, fuerzas aerodinámicas, técnica experimental.

INTRODUCCIÓN

Se presenta en el trabajo un sistema automático de control y seguimiento de procesos desarrollado íntegramente en el laboratorio de investigación de Aerodinámica de la Universidad Nacional del Nordeste, el cual se adapta a los requerimientos específicos necesarios para ensayos correspondientes y contempla la flexibilidad y adaptación de manera rápida a cualquier otro proceso de interés. La obtención de coeficientes aerodinámicos (o aero-elásticos), son obtenidos en túnel de viento, por métodos experimentales desarrollados por *Scanlan et. al.*, actualmente los más empleados en este tipo de estudios estructurales de puentes; este procedimiento, está siendo abordado por el Laboratorio de Aerodinámica de la UNNE, considerando la disponibilidad del túnel de viento de capa límite “Prof. Jacek Gorecki” y un canal de aire, de similares características.

La investigación está circunscripta al Proyecto de Investigación “Diagnóstico del potencial energético del recurso natural en el Nordeste Argentino” PICTO -2010- 0144 (ANPCyT – UNNE), para el cual se realizó una medición de vientos de superficie y de altura completando un modelo tridimensional georreferenciado de flujo no divergente y de conservación de masa ArgentinaMap-WindMap (Aires, 2014).

El interés actual en la generación de energía eólica como fuente renovable, del cual nuestro país posee gran potencial, confluyó en el estudio y desarrollo de aerogeneradores que contribuyan a la matriz energética. La distribución de estos parques eólicos cercanos a núcleos urbanizados, y el problema de la contaminación acústica asociada a aerogeneradores de gran diámetro, han llevado al estudio de diversos diseños de pequeño tamaño, debido a que la firma acústica generada es mayor a

¹ Estudiante Ingeniería Química – UTN FRRe. Correo-e: branco89@hotmail.com

² Jefe de Laboratorio – UNNE. Correo-e: jomaringa@gmail.com

³ Personal de Apoyo - IMIT- CONICET. Correo-e: juakcho@gmail.com

⁴ Personal de Laboratorio – UNNE.

⁵ Profesional UNNE.

⁶ Personal de Laboratorio – UNNE.

mayor velocidad de las aspas. Una forma de optimizar los aerogeneradores de pequeño tamaño es el diseño y ensayo de perfiles especiales que tengan un comportamiento óptimo para bajas velocidades y de pequeñas dimensiones. Se utiliza entonces el software desarrollado en conjunto con el instrumental en breve detallado y se realizan ensayos aerodinámicos con modelos de escala reducida en un túnel de viento de baja velocidad, con vientos estacionarios, uniformes y suaves.

En una primera etapa, la necesidad de ajustar técnicas experimentales, equipamiento de medición, sistemas de adquisición, almacenamiento, procesamiento estadístico de datos y expresión de resultados, se realizan ensayos en el canal de aire de un modelo rígido de un perfil alar NACA 4412; se miden presiones medias y fluctuantes para la obtención, por integración, de fuerzas de sustentación, arrastre y relación sustentación/arrastre, para distintos ángulos de incidencia del perfil alar (Juan 2014). De esta manera, se calibró y evaluó la confiabilidad del sistema de medición y las técnicas experimentales, obteniendo los primeros resultados de referencia para ensayos de características dinámicas de perfiles; el perfil alar NREL-S822 es entonces ensayado estáticamente en el túnel de viento, sometido a pruebas de semejanza correspondientes, para obtener los datos aerodinámicos característicos y poder estimar su potencial utilización en sistemas eólicos de generación de potencia de pequeño tamaño en la región.

MATERIALES Y MÉTODOS

Instrumental:

- PC de escritorio estándar: Pentium 4 2,4GHz; memoria RAM 736MB; SO Windows XP Professional SP3.
- Programas de cálculo:
 - MatLab®: R2008a versión 7.6.0.324 x32 con licencia educativa. Data Acquisition Toolbox instalado.
 - InstaCal®: Software de control y calibración particular de la Placa de Adquisición
 - Office Excel®: 2003
- Placa PCI-DAS1602_16 Measurement Computing®: Placa multifunción de entradas/salidas analógicas o digitales:
 - Puerto PCI
 - 16 entradas analógicas simples de 16 bits
 - 24 bits entradas/salidas digitales 2,4V - 36mW
 - Frecuencias de adquisición 0 – 200kHz
 - Rangos de entrada monopolar o bipolar seleccionables, 0-10 V con resolución de 153 μ V
 - Cableado C100FF-x
- Controlador solenoide CTRL2/s2-s6
- Dos escáneres transductores de presiones múltiple ScaniValve®
- Cuatro sensores de presión Honeywell® 160PC de 8V
- Interfaz electrónica propia (Boylestad,2009 y Ogata,2010):
 - Cableado C100FF-x
 - Optoacopladores 4N25
 - Conector de 100 puertos con 8 entradas analógicas. Aislado con puesta a tierra
- Cable coaxial con conector BNC HQ.
- Fuente de poder externa marca Hewlett Packard modelo E3630A.
- Micromanómetro Betz marca ACIN modelo 2500. Origen Holanda.
- Tubo Pitot – Estático: cuerpo de acero inoxidable para medición diferencial de la presión dinámica en un punto alineado delante del perfil dentro del túnel. Origen Holanda.
- Túnel de viento: Túnel de viento de capa límite “Prof. Jacek Gorecki” del Laboratorio de Aerodinámica (UNNE), con características de velocidad media e intensidad de turbulencia para un viento atmosférico suave y uniforme, de circuito abierto, con cámara de ensayo de 2,4 m de ancho \times 1,8 m de alto \times 22,8 m de largo y dos zonas de ensayo; el escurrimiento uniforme y suave es obtenido en la parte anterior de la cámara del canal, en tanto, al final de la misma, el flujo es no- uniforme y turbulento. Un ventilador axial de 2,25 m de diámetro accionado por un motor trifásico inductivo de 92 kW produce una velocidad máxima en vacío de 25 m/s en la mesa II (Aires 2014) Para los ensayos del perfil alar, vinculado por medio de

un eje transversal a media altura de la cámara de ensayo, se desarrolla un escurrimiento con intensidad de turbulencia de 0,01. Con anterioridad, se ha relevado la calidad de flujo del túnel de viento mediante varios estudios específicos (Wittwer 2000)

- Perfil aerodinámico NREL S822: perfil de pequeñas turbinas de viento de eje horizontal diseñado y estudiado por el *Departamento de Energía de los Estados Unidos, Laboratorio Nacional de Energía Renovable (NREL)*. El mismo se encuentra en una categoría de perfiles diseñados para trabajar a velocidades de viento bajas y números de Reynolds en el orden de 1×10^6 a fin de optimizar el funcionamiento de aerogeneradores en zonas de vientos leves. Este perfil en particular no fue diseñado para trabajar en niveles bajos de ruido. El modelo posee 3 líneas de tomas de presión ubicadas en la zona central del ancho del modelo seccional y en las zonas externas a izquierda y derecha del mismo; lo que proporciona al estudio 3 sub-perfiles levemente diferentes con 26 tomas de presión cada una, una cuerda constante de 284,5 mm, longitud de extradós de 298,5 mm, longitud de intradós de 292 mm, y una envergadura total de 60 cm. Fue construido a una escala geométrica compatible con la relación de bloqueo admisible para la cámara de ensayo. (Figura 1)

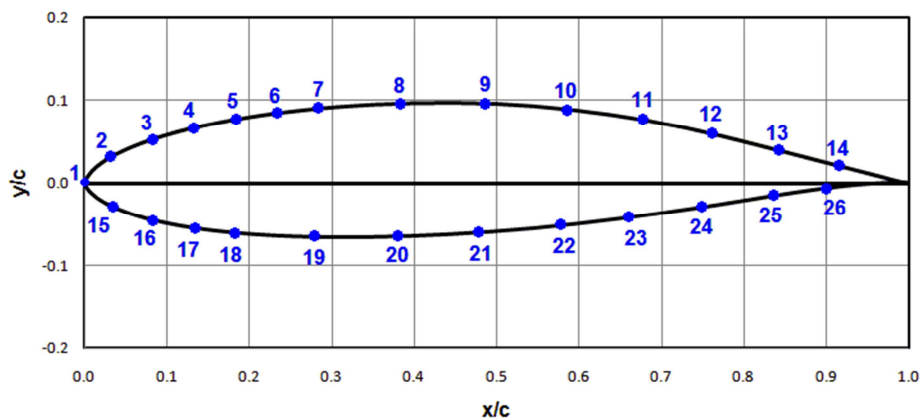


Figura 1: Ubicación de las tomas de presión estáticas perfil aerodinámico NREL S822

Software de Adquisición:

MatLab® es una herramienta de cálculo y control de Hardware potente, su interacción con placas de adquisición Measurement Computing® permite aprovechar al máximo la performance de la adquirida por el laboratorio. Permite además la completa adecuación a los ensayos previstos porque el usuario programa todo el desarrollo de la experiencia (Halvorsen 2012).

La metodología de control escogida es de algoritmia lineal recursiva, basada en programación lineal clásica, con interfaz alfanumérica e introducción de parámetros obtenidos de los ensayos, decisiones básicas y presentación de resultados gráficos y numéricos.

Se controlan principalmente frecuencias de adquisición, tiempo o bien cantidad de datos de adquisición, rango de voltaje de entrada, cantidad de puertos a utilizar para las entradas analógicas, tiempos de espera, repetición de subprocesos, y particularidades en la presentación de resultados (directorios, gráficos, variables).

La presentación de resultados consta de dos fases: una hic et nunc en la que se generan gráficos de función de onda de la señal transformada vs tiempo, gráficos de espectros de onda de las frecuencias del fenómeno y relevancia energética utilizando el método de transformada rápida de Fourier, e impresión en pantalla de información necesaria e indispensable para la toma de decisiones en el acto. Otra fase a posteriori, en la que se exporta todas las variables de interés a archivos con extensión de planilla Excel®, Gnuplot y planillas MatLab®.

Parámetros de ensayo:

- Selección de frecuencia: Se cuenta con la posibilidad de adquisición en frecuencias desde 1 a 200.000 Hz según las características de la placa informática. Se definió una adquisición óptima en 1000 Hz teniendo en cuenta los trabajos anteriores (Juan 2014).
- Tiempos de Toma: 5 segundos durante los cuales se adquieren continuamente todos los datos.
- Tiempos de estabilización: Los dispositivos mecánicos del circuito de adquisición, en particular la selección secuencial de los ScaniValve y los trayectos de las mangueras de transmisión, inducen un retardo y un transitorio de primer orden que afectan la exactitud de los valores sensados. A fin de minimizar el error se asigna un tiempo de estabilización de presiones previo a cada toma de datos que implica 10 segundos.
- Calibración: Se realiza a decisión una calibración lineal previa a la adquisición y otra posterior, ambas a una frecuencia de 1000 Hz y de 1 segundo por patrón para cada sensor utilizado de forma paralela. En base a los anteriores trabajos (Juan 2014) se realiza una calibración de 5 puntos a -10, 0, 100, 150 y 200 Pa diferenciales. La comparación de la sensibilidad y la ordenada al origen antes y después del ensayo aseguran el funcionamiento estable de los cuatro sensores utilizados.

Metodología:

Los ensayos fueron realizados con viento incidiendo desde -7 a $+7$ °, a intervalos de 1° fijando el modelo de manera manual. Para cada dirección de la componente longitudinal del viento analizada (ángulo α) respecto a la cuerda, se determinaron los coeficientes de presión en las áreas tributarias de cada toma, las que posteriormente son integradas para obtener los coeficientes de sustentación y arrastre globales para cada uno de los tres sub-perfiles. La adquisición de datos de presión estática del perfil, estática y total del pitot-prandtl a media altura se realiza de manera simultánea para evitar cualquier interferencia dependiente del tiempo que pudiese producirse en el flujo de aire durante el ensayo.

La presión estática en cada toma de presión fue medida con sensor Honeywell PC 160 a través de la válvula secuencial Scanivalve. Adicionalmente, se midieron la temperatura absoluta, T (de bulbo seco) con un termómetro de mercurio en las cercanías del túnel de viento, con precisión de un decimal, y la presión atmosférica, P_{atm} , para el ajuste de la densidad, ρ , del aire. Las mismas se introducen al sistema manualmente.

En (Tabla 1) se muestran las condiciones de ensayo para cada uno de los ángulos de ataque ensayados.

α (°)	T [K]	P_{atm} (Pa)	ΔP_{pitot} (Pa)	V [m/s]	ρ (Kg/m ³)	Re
-7	294,15	101325,00	294	22,134	1,2002	414960
-6	294,15	101391,66	293	22,089	1,2010	414390
-5	294,15	101391,66	295	22,164	1,2010	415802
-4	293,15	101524,98	296	22,149	1,2067	418556
-3	293,15	101458,32	297	22,194	1,2059	419125
-2	293,15	101524,98	296	22,149	1,2067	418556
-1	293,15	101524,98	296	22,149	1,2067	418556
0	293,15	101591,64	298	22,217	1,2075	420105
1	292,15	101524,98	298	22,186	1,2108	421762
2	292,15	101591,64	298	22,179	1,2116	421901
3	292,15	101591,64	299	22,216	1,2116	422608
4	292,15	101591,64	297	22,142	1,2116	421192
5	292,15	101524,98	298	22,186	1,2108	421762
6	292,15	101524,98	298	22,186	1,2108	421762
7	292,65	101524,98	297	22,168	1,2088	420157

Tabla 1: Condiciones de ensayo del perfil alar NREL S822.

Detalle de cálculo: Método por Distribución de Presiones.

Las características constructivas del perfil NREL S822 se detallan en la (Tabla 2)

Perfil 1			Perfil 2			Perfil 3		
Parte superior			Parte superior			Parte superior		
toma	Superficie (mm ²)	Ángulo (rad)	toma	Superficie (mm ²)	Ángulo (rad)	toma	Superficie (mm ²)	Ángulo (rad)
1	326,6	1,57075	27	326,6	1,57075	53	326,6	1,57075
2	324,3	0,55849	28	324,3	0,54104	54	324,3	0,52358
3	324,3	0,27924	29	324,3	0,29233	55	324,3	0,30542
4	324,3	0,18325	30	324,3	0,18064	56	324,3	0,17802
5	324,3	0,10472	31	324,3	0,12435	57	324,3	0,14399
6	324,3	0,06981	32	324,3	0,08290	58	324,3	0,09599
7	466,9	0,03491	33	466,9	0,05236	59	466,9	0,06981
8	609,5	-0,01745	34	609,5	0,00218	60	609,5	0,02182
9	609,5	-0,05585	35	609,5	-0,06283	61	609,5	-0,06981
10	588,8	-0,09250	36	588,8	-0,09206	62	588,8	-0,09163
11	570,4	-0,15882	37	570,4	-0,14049	63	570,4	-0,12217
12	570,4	-0,13962	38	570,4	-0,14137	64	570,4	-0,14311
13	609,5	-0,15708	39	609,5	-0,16144	65	609,5	-0,16580
14	1048,8	-0,19198	40	1048,8	-0,20071	66	1048,8	-0,20943
Parte inferior			Parte inferior			Parte inferior		
toma	Superficie (mm ²)	Ángulo (rad)	toma	Superficie (mm ²)	Ángulo (rad)	toma	Superficie (mm ²)	Ángulo (rad)
15	328,9	-0,3892	41	328,9	-0,34513	67	328,9	-0,30106
16	328,9	-0,14137	42	328,9	-0,13177	68	328,9	-0,12217
17	328,9	-0,08726	43	328,9	-0,09163	69	328,9	-0,09599
18	473,8	-0,06981	44	473,8	-0,08290	70	473,8	-0,09599
19	618,7	-0,00436	45	618,7	-0,01265	71	618,7	-0,02094
20	598,0	0,03491	46	598,0	0,02792	72	598,0	0,02094
21	577,3	0,11344	47	577,3	0,10035	73	577,3	0,08726
22	577,3	0,10995	48	577,3	0,09599	74	577,3	0,08203
23	577,3	0,13090	49	577,3	0,11344	75	577,3	0,09599
24	618,7	0,12217	50	618,7	0,10908	76	618,7	0,09599
25	618,7	0,07156	51	618,7	0,08116	77	618,7	0,09075
26	908,5	0,01745	52	908,5	0,04800	78	908,5	0,07854

Tabla 2: Ángulos de la superficie relativos a la cuerda y superficie tributaria asignada a cada toma.

La densidad del aire se calcula según la ley de los gases ideales (Fórmula 1):

$$\delta_{aire} = \frac{P_{atm}}{278 \times T_{amb}} \quad (1)$$

La viscosidad dinámica del aire se calcula según: (Fórmula 2)

$$\mu_{aire} = (4.6286e - 008) \times T_{amb} + 4.5666e - 006 \quad (2)$$

La presión dinámica de referencia, medida en el flujo no perturbado, es obtenida con tubo de Pitot-Prandtl.

La velocidad media del túnel en corriente libre se calcula según: (Fórmula 3)

$$\overline{V_\infty} = \sqrt{2 \times \overline{P_\infty} / \delta_{aire}} \quad (3)$$

El número de Reynolds entonces viene dado por: (Fórmula 4)

$$Re = \frac{\delta_{aire} \times \overline{V_\infty} \times c}{\mu_{aire}} \quad (4)$$

Las diferencia (Fórmula 5) de presión estática medidas en cada una de las tomas de presión distribuidas sobre el perfil alar y la presión dinámica de flujo sin perturbar, se referencian a esta última permitiendo definir los coeficientes de presión local (Fórmula 5).

$$\Delta p = p_i - p_\infty = \rho \times \left(\frac{v_\infty^2}{2} - \frac{v_i^2}{2} \right) \rho \times \frac{v_\infty^2}{2} \times \left(1 - \frac{v_i^2}{v_\infty^2} \right) \quad (5)$$

$$Cp = \frac{\Delta p}{\rho \times \frac{v_\infty^2}{2}} = \left(1 - \frac{v_i^2}{v_\infty^2} \right) \quad (6)$$

La resultante de los coeficientes de presión normal, C_n , y tangencial, C_t , son integradas de las contribuciones de los coeficientes de presión de cada una de las tomas (Fórmula 7).

$$C_{n_{Ataq}} = \int_S Cp \times dS_N \quad C_{t_{Ataq}} = \int_S Cp \times dS_T \quad (7)$$

La expresión discreta para cada una de las 26 tomas de presión a lo largo del extradós e intradós, están dadas por las (Fórmula 8) y (Fórmula 9).

$$C_{n_{Ataq}} = \left[- \sum_{i=1}^{14} (Cp_i \times \cos(\text{Ángulo}_i) \times \Delta_{perim_{sup}}) + \sum_{i=15}^{26} (Cp_i \times \cos(\text{Ángulo}_i) \times \Delta_{perim_{inf}}) \right] \times \frac{1}{c} \quad (8)$$

$$C_{t_{Ataq}} = \left[\sum_{i=1}^{14} (Cp_i \times \sin(\text{Ángulo}_i) \times \Delta_{perim_{sup}}) - \sum_{i=15}^{26} (Cp_i \times \sin(\text{Ángulo}_i) \times \Delta_{perim_{inf}}) \right] \times \frac{1}{c} \quad (9)$$

Los Coeficientes de Sustentación, C_L , y Arrastre, C_D , referidos a la dirección del escurrimiento son las resultantes vectoriales de los Coeficientes Normal y Tangencial afectados del ángulo de ataque del perfil para cada situación de muestreo (Fórmula 10) y (Fórmula 11).

$$C_L(Ataq) = C_{n_{Ataq}} \times \cos(Ataq) - C_{t_{Ataq}} \times \sin(Ataq) \quad (10)$$

$$C_D(Ataq) = C_{n_{Ataq}} \times \sin(Ataq) + C_{t_{Ataq}} \times \cos(Ataq) \quad (11)$$

RESULTADOS

Se obtuvieron los siguientes coeficientes de presión a lo largo del extradós e intradós de los tres sub-perfiles del modelo de perfil alar NREL S822 para ángulos de ataque de -7 a 7 grados. Se presentan en la (Figura 2) aquellas curvas respectivas a -6, -3, 0, 3 y 7 grados únicamente.

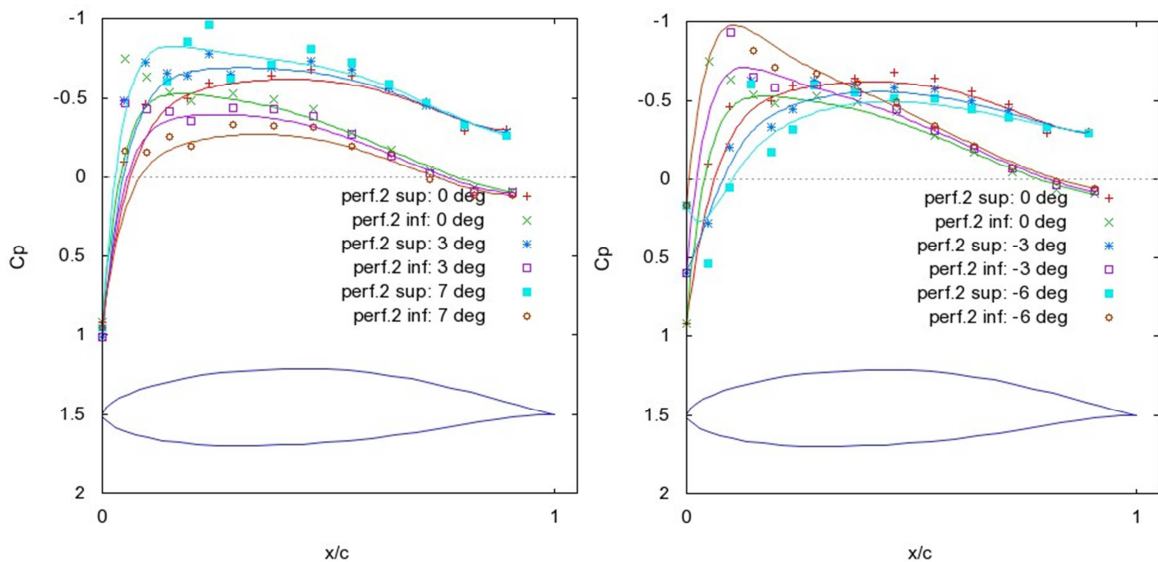


Figura 2: Distribución de coeficientes de presión para el perfil aerodinámico NREL S822, para distintos ángulos de ataque

Se obtuvieron los siguientes coeficientes de arrastre global de los tres sub-perfiles del modelo de perfil alar NREL S822 (Figura 3)

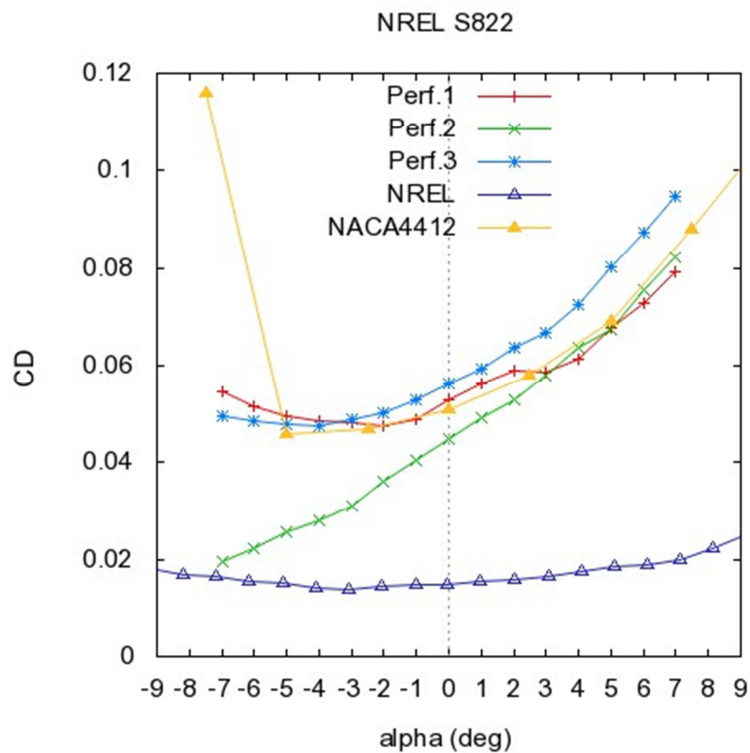


Figura 3: Coeficientes de arrastre en función del ángulo de ataque. A modo de comparación se muestran los valores obtenidos de ensayo del perfil NACA 4412 NACA 4412 (Juan 2014) y los valores experimentales de la referencia Selig (2004)

A continuación, debido a las desviaciones encontradas, se procede a estimar la sensibilidad de cambio en el cálculo del coeficiente de arrastre en función de un posible error de lectura del ángulo de ataque. Se presentan las diversas curvas para el ejemplo del sub-perfil 1 posicionado en el centro de la envergadura del perfil alar (Figura 4).

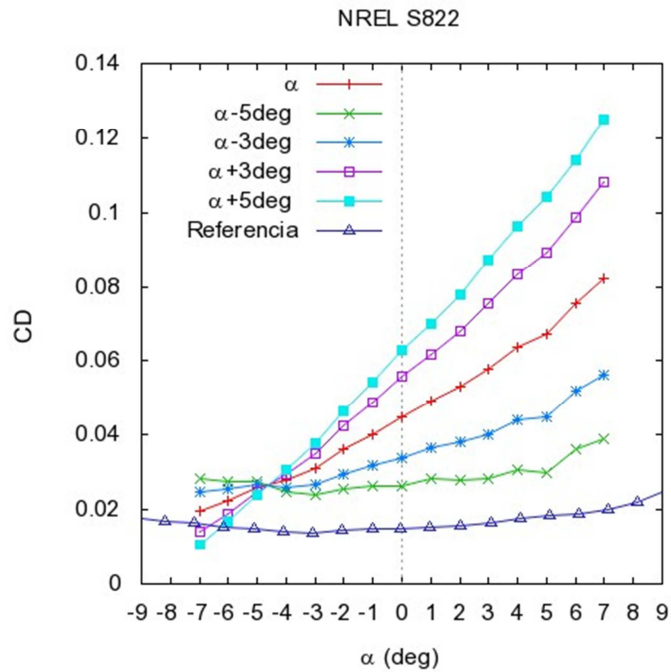


Figura 4: Estimación de la sensibilidad de los coeficientes de arrastre del sub-perfil 1 por un posible error cometido en el ángulo de ataque de ensayo.

Se obtuvieron los siguientes coeficientes de sustentación global de los tres sub-perfiles del modelo de perfil alar NREL S822 (Figura 5)

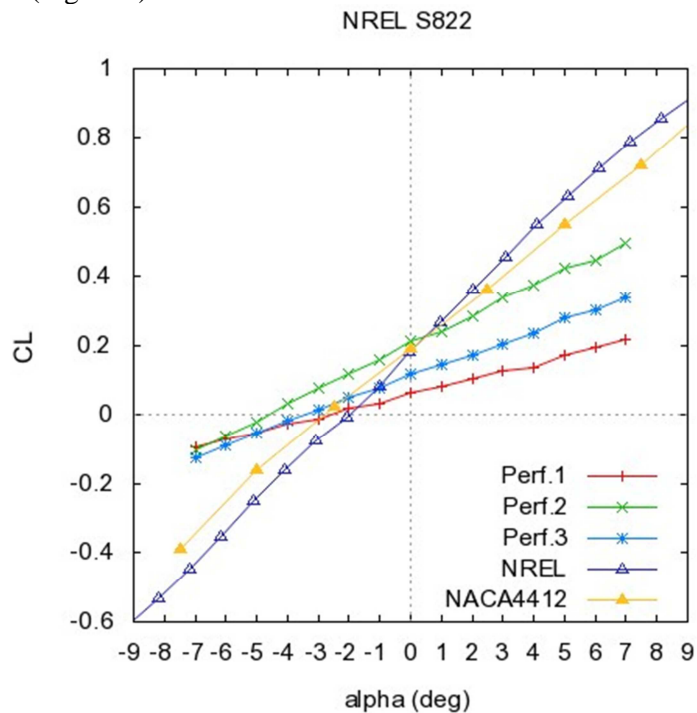


Figura 5: Coeficientes de sustentación en función del ángulo de ataque. A modo de comparación se muestran los valores obtenidos de ensayo del perfil NACA 4412 (Juan 2014) y los valores experimentales de la referencia Selig (2004)

Se obtuvieron finalmente las siguientes curvas de CD vs CL de los tres sub-perfiles del modelo de perfil alar NREL S822 (Figura 6)

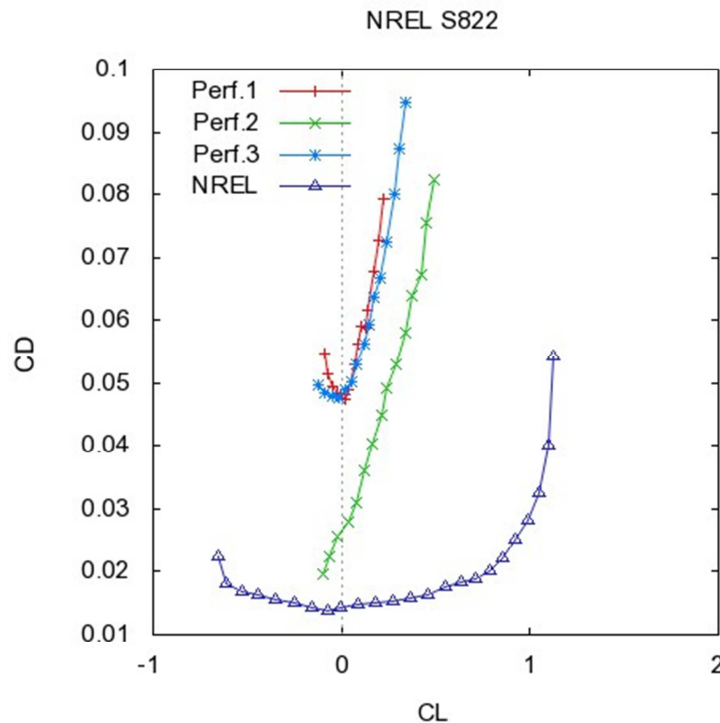


Figura 6: Característica CD vs Cl del perfil NREL S822. Como referencia se muestran los valores de ensayo de Selig (2004) y [3]

CONCLUSIONES

Los coeficientes de presión obtenidos reflejan, en general, el comportamiento esperado (Selig 2004) y (Somers 2005) para este tipo de perfiles a lo largo de la superficie del extradós e intradós. Y las tres secciones de ensayo o sub-perfiles presentaron una distribución similar, tanto para ángulos de ataque positivos como negativos. Sin embargo la exactitud de los datos presenta un gran desplazamiento atribuible a una falla en algún componente de medición.

Los coeficientes de arrastre de los tres sub-perfiles presentan una desviación positiva respecto a la referencia, y a su vez valores netos cercanos a los del perfil NACA 4412, lo que asegura la existencia de un error sistemático en el sistema de medición aún no subsanado desde la verificación del mismo (Juan 2014). Se da especial atención a la comparación únicamente de gráficas, debido a que no se puede establecer ninguna relación dinámica simple, ya que no sólo el perfil no es el mismo sino que no se utilizaron el mismo túnel de viento ni números de Reynolds cercanos.

Mediante el análisis de sensibilidad de cálculo se puede considerar de relevante importancia un error introducido en la sujeción del perfil y la verificación del ángulo de ataque durante el ensayo. Se propone adquirir nuevo material para realizar esta tarea de manera automática.

Las conclusiones devenidas de los gráficos del coeficiente de sustentación hacen también referencia a un error pero en este caso no sistemático ni relacionado con el ángulo de ataque (no muestra sensibilidad al cambio apreciable en el cálculo)

Para todos los ensayos, la menor relación de CL/CD para los sub-perfiles de los extremos respecto a la envergadura, indica claramente una turbulencia de vórtices y un desprendimiento indeseado por efecto borde. Se propone para posteriores ensayos alejar aún más las tomas de presión de los bordes del modelo a escala utilizado.

El software utilizado demostró estabilidad aceptable a lo largo de su implementación, y una velocidad ampliamente superior que pasa a ser clave en el momento de llevar a cabo varias experiencias repetidas. La reproducibilidad de los ensayos al no depender directamente del sujeto, brinda la seguridad buscada en los laboratorios e industrias de la actualidad. Es por tanto, una vez complementado con técnicas más exactas de fijación de los modelos a escala, una herramienta útil y poderosa para el estudio y desarrollo de aerogeneradores.

Se propone utilizar el software desarrollado para estudios intensivos de otros fenómenos de aplicación ingenieril.

Agradecimientos:

A los señores Beatriz Iturri, Julian Ortiz, y Amadeo Arrieta.

Al Ing. Adrián Wittwer.

Además especialmente a la SGCyT de la Universidades Nacional del Nordeste, la Universidad Tecnológica Nacional (FRRe) y al Comité Organizador de ASADES 2015, Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional San Rafael Mendoza, Argentina

NOMENCLATURA

c	Cuerda
AmT	Ancho medio total
x	Coordenada horizontal del perfil
Pest	Presión estática
P∞	Presión dinámica en sección libre
Cp	Coefficiente de Presión
Cn	Coefficiente de Presión Normal
Ct	Coefficiente de Presión Tangencial

CD	Coefficiente de Arrastre
CL	Coefficiente de Sustentación
v	Velocidad del aire
μ	Viscosidad dinámica del Aire
T	Temperatura absoluta
Re	Número de Reynolds
Ataq	Ángulo de Ataque
DS	Desviación Estándar

REFERENCIAS

- Marcelo Aires, Mario E. De Bortoli, Pedro Marcelo Obregón, Jorge O. Marighetti (2014). Potencial Eólico de las Provincias de Corrientes, Chaco y Formosa. XXXVII Reunión de Trabajo de ASADES S. Vol. 2, pp. 06.137-06.146 . Impreso en la Argentina. ISBN 978-987-29873-0-5.
- Michael S. Selig, Bryan D. McGranahan (2004). Subcontractor Report Wind Tunnel Aerodynamic Tests of Six Airfoils for Use on Small Wind Turbines October 31, 2002–January 31, 2003. University of Illinois at Urbana-Campaign Urbana, Illinois National Renewable Energy Laboratory. NREL/SR-500-34515
- D.M. Somers (2005). Subcontractor Report: The S822 and S823 Airfoils October 1992 - December 1993 Airfoils, Inc. State College, Pennsylvania National Renewable Energy Laboratory. NREL/SR-500-36342
- Juan, Branco; Marighetti, Jorge O. (2014). Mediciones de Presión Media y Fluctuante en Túnel de Viento de Baja Velocidad y Cálculo de fuerzas Aerodinámicas de un Perfil NACA 4412. IV Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica, CAIM 2014, 02-05 de Setiembre de 2014, Resistencia (Chaco. Argentina). ISBN 978-987-45571-0-0.
- A. R. Wittwer, S. V. Möller (2000), Characteristics of the low speed wind tunnel of the UNNE, J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., 84 (3), pp. 307-320.
- Hans-Petter Halvorsen (2012) - DAQ in MatLab. Telemark University College Department of Electrical Engineering, Information Technology and Cybernetics
- Boylestad y Nashelsky (2009) - Electrónica Teoría de Circuitos 10ªEd
- Datsheet 4N25 - Fairchild Semiconductor Corporation
- K. Ogata (2010) - Ingeniería de Control Moderna 5ª Ed Prentice Hall Pearson Educación
- Tom Lawson (2001) - Building Aerodynamics, Imperial College Press, London, UK.
- <http://www.nrel.gov>

ABSTRACT:

This work is part of the draft estimates of wind resource potential of the provinces of Chaco, Formosa and Corrientes. Regional and population necessities obligate industries develop extremely optimized wind turbines according to each different situation and therefore more precise and fast control and verification methods. To achieve that goal a normalized airfoil suitable to be used in wind turbines, and selected with the criterion of optimizing the available wind resources, is studied. An automatized acquisition system for the aerodynamic analysis of basic coefficients is used in a medium pressure wind tunnel with the NREL S822 airfoil. The pressure matrix integration method is adapted to a normalized sectional rigid model; mean and fluctuating surface pressures are obtained among three lines of pressure sensors located around the perimeter of the airfoil. The results for different angles of attack, compared with reports of experimental studies of NREL show generally good agreement.