



# IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO  
DOCENTE  
DEL AREA  
MECANICA  
DE LAS  
INGENIERIAS

FoDAMI

## BALANCEO DE UNA TURBINA TIPO DARRIEUS

**Jorge Lassig\***, Daniel Maranghello, Germán G. Keil, Damián F. Campos

Dpto. Mecánica Aplicada, Facultad de Ingeniería – Universidad nacional del Comahue

Buenos Aires 1400 Neuquén – Prov. del Neuquén - Argentina

correo-e:

jorge.lassig@fain.uncoma.edu.ar

daniel.maranghello@fain.uncoma.edu.ar

german.keil@fain.uncoma.edu.ar

damian.campos@fain.uncoma.edu.ar

### RESUMEN

Las turbinas de viento son extremadamente propensas a las vibraciones. Podemos clasificar el origen de las mismas en: a) Desbalanceo de masas (principalmente en las palas); b) Desequilibrio aerodinámico.

Los aerogeneradores de eje horizontal (HAWT) tienen una configuración esbelta y elástica; por lo tanto estas estructuras son sensibles a las vibraciones. En las dos últimas décadas con el auge de la generación de origen eólico en el mundo, se desarrollaron importantes técnicas tanto para el balanceo, como en la predicción de las vibraciones para las turbinas HAWT.

Por el contrario, en los aerogeneradores de eje vertical (VAWT), las técnicas para solucionar este tipo de problemas son de escasa difusión.

En la Facultad de Ingeniería de la U.N.Comahue se están estudiando las turbinas de eje vertical del tipo Darrieus. Se construyó un modelo a escala para ser ensayado en túnel de viento, con el objeto de obtener información de parámetros aerodinámicos para futuros desarrollos.

A los efectos de garantizar una adecuada estabilidad dinámica del rotor, para las pruebas en túnel señaladas, se procedió a realizar el balanceo del rotor y a la determinación de las frecuencias naturales flexionales, en el plano de las aspas y a 90°, empleando el test de *Hammer*. Esta determinación, permitió acotar las velocidades de operación del prototipo.

Al ser la construcción de las palas de origen artesanal (P.R.F.V.), se presentaron diferencias de peso importantes, dada la forma geométrica de las mismas, complicando la ubicación de las masas correctoras durante la rutina de balanceo. Para salvar esta situación, se utilizó una técnica propia que consistió en agregarle masa en forma distribuida en el interior de las palas. Las mediciones finales de vibraciones, en el rango definido de operación, arrojaron valores aceptables para el tipo de turbina en cuestión.

Las correcciones realizadas, aseguraron la correcta determinación de las cargas aerodinámicas sobre el rotor en el túnel, sin influencia de amplificaciones resonantes.

**Palabras claves:** Rotor, Eólico, Darrieus, Vibraciones, Balanceo



# IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO  
DOCENTE  
DEL AREA  
MECANICA  
DE LAS  
INGENIERIAS

FoDAMI

## 1. INTRODUCCIÓN

En la Facultad de Ingeniería de la U.N. Comahue se están estudiando las turbinas de eje vertical del tipo Darrieus. Se construyó un modelo a escala para ser ensayado en túnel de viento, con el objeto de obtener información de parámetros aerodinámicos para futuros desarrollos.



*Figura 1: Fotografía del modelo de Darrieus que se construyó para realizar ensayos dentro de un túnel de viento.*

Una de las características de este tipo de turbinas de viento, es que las fuerzas aerodinámicas actuantes son cíclicas, y si la turbina presenta importantes diferencias de masas entre las aspas, estas acentuarán el desbalanceo produciendo vibraciones indeseadas.

Los problemas de vibraciones en las turbinas de viento son un fenómeno antiguo. Incluso en la Edad Media, el molino de viento de esa época se lo llamaba “rocking mill” [1], ya que al mismo se lo montaba completamente sobre un caballete para lograr un movimiento balanceado. Este inconveniente se convirtió entonces en un estímulo para el desarrollo de técnicas de balanceo, logrando en el transcurso del tiempo, que el molino de viento holandés fuera más estable y sin problemas de balanceo.

El origen de las vibraciones en las turbinas eólicas, las podemos clasificar en dos: (a) Por desbalanceo de masas (principalmente en las palas); y (b) Por desequilibrio aerodinámico.

Los aerogeneradores de eje horizontal (HAWT) tienen una configuración esbelta y elástica; por lo tanto estas estructuras son extremadamente propensas a las vibraciones. En las dos últimas décadas con el auge de la generación de origen eólico en el mundo, se desarrollaron importantes técnicas tanto para el balanceo, como en la predicción de las vibraciones para las turbinas HAWT.

Por el contrario, en los aerogeneradores de eje vertical (VAWT), las técnicas para solucionar este tipo de problemas son de escasa difusión [2].

El análisis de vibraciones tiene el objetivo de verificar la estabilidad dinámica y la ausencia de resonancias dentro del área de servicio admisible. Rangos de velocidad inestable, por ejemplo con respecto a una vibración de flexión de la torre, o resonancias de flexión o vibraciones de torsión de otros componentes estructurales importantes, se debe evitar, al menos en las fases de funcionamiento de estado estacionario.

Por esta razón, las frecuencias naturales de las palas del rotor, torre y componentes del tren de accionamiento mecánico no deben estar demasiado cerca uno del otro, y a su vez alejadas de las posibles frecuencias de excitación.

## 2. DESBALANCEO DE MASAS

Al ser la construcción de las palas de origen artesanal (P.R.F.V.), se presentaron diferencias de peso importantes, por lo que se procedió a realizar una serie de ensayos para determinar tanto el desbalanceo como la frecuencia de resonancia de la pequeña turbina Darrieus.



*Figura 2: Fotografía que muestran el proceso de fabricación artesanal de las aspas en PRFV.*

Por otra parte, la forma geométrica de las palas es muy distinta a las de las turbinas HAWT (donde la técnica de balanceo se parece a las de las hélices de aeronaves, la cual está muy bien desarrollada), pues estas aspas en su giro describen un volumen. Este hecho complica la ubicación de las masas correctoras durante la rutina de balanceo. Para salvar esta situación, se utilizó una técnica propia que consistió en agregarle masa en forma distribuida en el interior de las palas. Las mediciones finales de vibraciones, en el rango definido de operación, arrojaron valores aceptables conforme a estándares de aplicación corriente [3].

### 2.1. Instrumental



# IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO  
DOCENTE  
DEL AREA  
MECANICA  
DE LAS  
INGENIERIAS

FoDAMI

Se realizaron los ensayos con un equipo de análisis de vibraciones DSP Logger MX300. Se utilizó un medidor óptico (tacómetro estroboscópico Lutron DT-2259) para determinar las rpm del eje de la turbina eólica, y un acelerómetro piezoeléctrico para determinar las aceleraciones y el desplazamiento del eje.

## 2.2. Determinación de las Frecuencia Naturales

Se empleó el test de *Hammer* para determinar las frecuencias naturales del rotor de la turbina Darrieus en el plano de las aspas y a  $90^\circ$ .

Los resultados obtenidos en relación al primer modo flexional del rotor fueron:

- Frecuencia natural en el plano de las aspas: 6,625 Hz.
- Frecuencia natural en el plano perpendicular al de las aspas: 6,250 Hz.

Los valores señalados representan 397,5 rpm y 375 rpm respectivamente, por lo que el umbral (20% más y menos de la frecuencia de resonancia) crítica está entre 300 y 477 rpm.

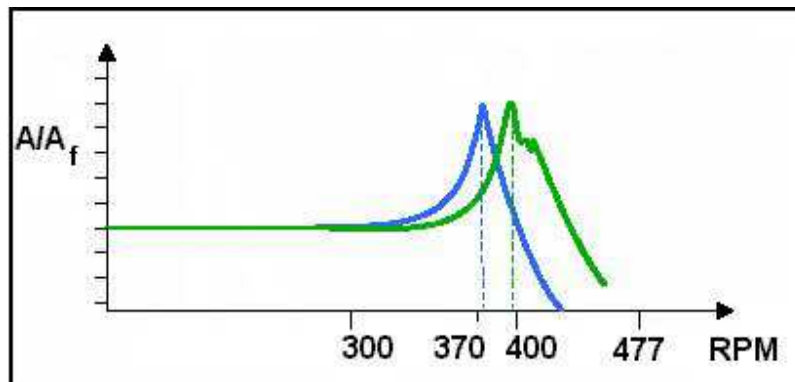


Figura 3: Frecuencias de resonancia en el plano del rotor (verde) y a  $90^\circ$  (azul).

## 2.3. Determinación del comportamiento dinámico en operación. Balanceo

A la turbina Darrieus se la accionó por medio de un motor de corriente continua de 3 CV con variador de velocidad, como se observa en la figura 4.



# IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO  
DOCENTE  
DEL AREA  
MECANICA  
DE LAS  
INGENIERIAS

FoDAMI



Figura 4: Acople del motor de CC a la turbina Darrieus por medio de un sistema de correas y poleas.

Teniendo presente el rango de velocidades a evitar expuesto en el apartado 2.1, para limitar las amplificaciones por efecto de resonancias, empleando el instrumental indicado en 2.1, y en el modo rígido, se procedió a una serie de intervenciones en el interior de las aspas, hasta lograr niveles de vibraciones aceptables en el parámetro desplazamiento, conforme a las características del prototipo de turbina tipo Darrieus.

Las mediciones finales se realizaron a tres velocidades de giro, obteniendo los valores que se representan en la figura 5. En la misma se puede visualizar el incremento controlado de los desplazamientos en función de la velocidad de giro.

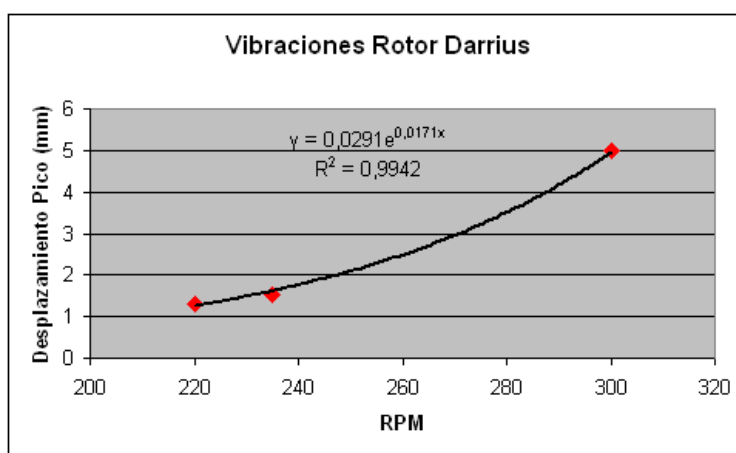


Figura 5: Incremento del desplazamiento pico a pico con la velocidad.



# IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO  
DOCENTE  
DEL AREA  
MECANICA  
DE LAS  
INGENIERIAS

FoDAMI

### 3. ENSAYOS EN EL TÚNEL DE VIENTO

Los ensayos se realizaron en el túnel de capa límite, de circuito abierto, instalado en el Laboratorio de Capa Límite y Fluidodinámica Ambiental (LaCLyFA) del Departamento de Aeronáutica, de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de La Plata.

El túnel tiene 24 m de longitud y sección transversal constante de 2,60 m x 1,80 m. Funciona por aspiración y cuenta con nueve ventiladores, cada uno de 1,25 m de diámetro y 15 HP de potencia (Figura 6).

La velocidad máxima a la que pueden realizarse ensayos es de 15 m/s.

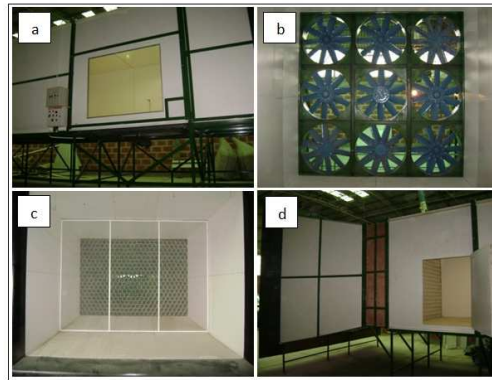


Figura 6: Túnel de viento de las pruebas: a) sección de prueba, b) ventiladores, c) tobera de entrada, d) sección de inicio del túnel. (Colman y otros, 2012)

En la figura 7 se puede observar el montaje del modelo de la turbina Darrieus dentro del túnel de viento. La velocidad del viento se midió con un tubo Pitot (por delante de la turbina), conectado a un datalogger Testo 512, y las rpm con el tacómetro mencionado anteriormente.

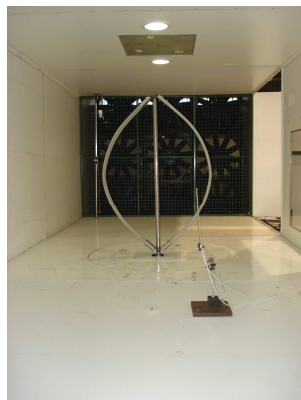


Figura7: Modelo montado en el túnel de viento

La relación entre la velocidad del viento y las de giro alcanzadas se indican en la figura 8. Se puede observar que esta última estuvo por debajo de las velocidades ensayadas para determinar las condiciones de inestabilidad del rotor, y con el rotor con el desbalanceo residual emergente del procedimiento de corrección detallado en el apartado 2.3.

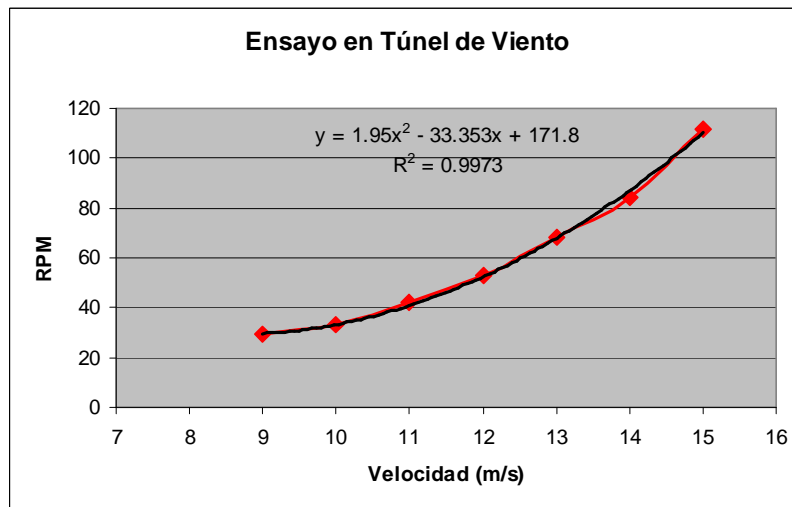


Figura 8: Variación de las rpm de la turbina eólica en función de la velocidad del viento.

### 3.1. Determinación de las cargas aerodinámicas.

Debido a que las palas de la turbina Darrieus gira 360° con respecto al viento incidente, estas ofrecen en cada tramo una superficie distinta y por lo tanto el ángulo de ataque que siente la pala varía punto a punto, por lo que las cargas sobre cada pala y en su conjunto sobre el rotor son totalmente cíclicamente variables.

En la figura 9 se puede observar dos posiciones del rotor, a la izquierda las palas están alineadas con el viento y por lo tanto el ángulo de ataque del perfil aerodinámico de cada pala es pequeño y genera una fuerza resultante lateral a las mismas. Pero al girar 90° y ubicar ambas palas perpendicularmente al viento, estas se comportan como una placa plana y generan una gran fuerza de arrastre en la dirección del viento, deformando el eje hacia la derecha.

El valor de la frecuencia de estas fuerzas cíclicas es proporcional a la velocidad de giro.

En nuestro ensayo en el túnel de viento las frecuencias fueron entre 0,15 y 0,25 Hz, muy por debajo del umbral de frecuencias encontradas por medio del test de Hammer.



# IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO  
DOCENTE  
DEL AREA  
MECANICA  
DE LAS  
INGENIERIAS

FoDAMI

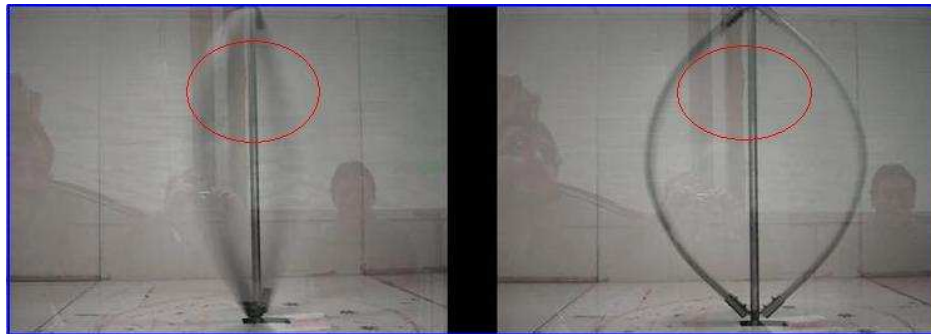


Figura 9: Efecto de las cargas aerodinámicas variables, sobre la deformación del rotor en funcionamiento.

## 4. CONCLUSIONES

Se determinó en forma experimental la frecuencia natural flexional del rotor de la turbina Darrieus de pequeño tamaño, en una instancia previa y necesaria para la realización posterior de ensayos a escala de este tipo de aerogeneradores dentro de un túnel de viento, donde es posible controlar dicha velocidad.

Se desarrolló un método de balanceo no tradicional, pues en lugar de colocar masas puntuales de contra peso para reducir el desbalanceo, se utilizó una distribución lineal de masas por el interior de una de las palas, logrando así un adecuado balanceo.

El ensayo en el túnel de viento en el cual se determinaron varios parámetros aerodinámicos de esta turbina, se realizó a velocidades de giro muy por debajo de las frecuencias naturales del rotor. Por lo tanto, las determinaciones de las cargas aerodinámicas sobre el rotor, como es necesario, no estuvieron influenciadas por efectos de resonancias mecánicas.

## 5. REFERENCIAS

- [1] E. Hau, Vibration Problems; Wind Turbines, Ed. Springer, Berlin, 2006.
- [2] A. Albani, M.Ibrahim, Preliminary Development of Prototype of Savonius Wind Turbine for Application in Low Wind Speed in Kuala Terengganu, Malaysia, Inter Journal of Scientific & Technology Research Vol 2, Issue 3, pp.102-108, 2013.
- [3] ISO 1940-1; Mechanical vibration -- Balance quality requirements for rotors in a constant (rigid) state - Part 1: Specification and verification of balance tolerances.; European Standard, 2003.

## Agradecimientos

Este Proyecto se realizó con fondos del PICTO CIN II 2010-0085, y del proyecto de investigación de la Universidad Nacional del Comahue 04/I 185.