

## DESARROLLO DE TURBINA EÓLICA A EJE VERTICAL PARA APLICACIONES DE BOMBEO DE AGUA EN ASENTAMIENTOS RURALES AISLADOS

**Manavella L.**<sup>(1)(2)</sup>, **Micheloud P.**<sup>(2)</sup>, **Salomone J.**<sup>(1)(2)</sup>, **Cova W.**<sup>(3)(4)</sup>

<sup>(1)</sup> Departamento de Ingeniería Mecánica UTN-FRC

<sup>(2)</sup> CII (Centro de Investigación en informática para Ingeniería) UTN-FRC

Maestro M. López Esq. Cruz Roja Argentina - Ciudad Universitaria C.P. (X5016ZAA)

<sup>(3)</sup> Departamento de Ingeniería Electrónica – Cátedra Proyecto Final UTN-FRLR

San Nicolás de Bari (e) 1.100 C.P. (5300) La Rioja

<sup>(4)</sup> FUNDACIÓN ECOLÓGICA VALLE DE HUACO - Hipólito Irigoyen 73 – 5300 La Rioja  
e-mail: lucianomanavella@yahoo.com.ar

### RESUMEN

La Fundación Ecológica Valle de Huaco ha realizado el desarrollo de una turbina eólica a eje vertical para aprovechamiento mecánico directo, como una posible solución a la carencia de elementos de bombeo para la acumulación y posterior tratamiento del agua en asentamientos humanos aislados del interior de la Provincia de La Rioja.

El proyecto se llevó a cabo en tres etapas. Partiendo de la premisa de que la turbina debía ser a eje vertical, debido a su sencillez constructiva, menor costo y aumento del rendimiento mecánico comparada con una turbina de eje horizontal, la primera etapa consistió en realizar un estudio sobre la forma y disposición de los álabes. Definido esto se procedió con los cálculos matemáticos necesarios para el dimensionamiento, incluyendo además el desarrollo y uso de un software para la simulación de la performance de la turbina. Esta etapa concluyó con el cálculo estructural y confección de los planos de ingeniería para la fabricación del prototipo. La segunda etapa involucro la construcción del prototipo. La tercera y última etapa consistió en instalar el prototipo construido, para evaluar su funcionamiento y realizar los ajustes y modificaciones necesarias.

**Palabras clave:** Turbina Eólica a Eje Vertical, Turbina Darrieus, Turbina Savonius.

### INTRODUCCIÓN

El objetivo perseguido por el Proyecto es desarrollar, construir e instalar un prototipo aplicativo de turbina eólica a eje vertical utilizable para el bombeo de agua en asentamientos rurales aislados, reuniendo los requisitos de bajo costo, facilidad de instalación y mantenimiento, y rendimiento suficiente para suplir las necesidades de un grupo humano de 15 a 20 integrantes, lo que traducido a requerimientos mecánicos implica acumular 2000 litros de agua en 10 horas de bombeo salvando un desnivel total de 20 metros.

Para lograr lo mencionado en el párrafo precedente, en el diseño de la TEV se han combinado elementos Savonius, para favorecer el arranque y Darrieus para mejorar el rendimiento aerodinámico a velocidades elevadas. Además, se adoptó una configuración tripala con el objeto de reducir las vibraciones inducidas por la naturaleza cíclica de las cuplas aerodinámicas actuantes.

### DESARROLLO

Teniendo en cuenta el volumen de agua a extraer y la altura de elevación, se realiza el cálculo de la potencia que se utiliza como punto de partida para comenzar a diseñar la turbina.

Datos:

$$Q = 200 \text{ l/h} : 5,5 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\gamma = 1000 \text{ kg/m}^3 : 9810 \text{ N/m}^3$$

$$H = 20 \text{ m}$$

$$\eta = 0,75$$

$$P = \frac{Q \times \gamma \times H}{\eta} = 14,5 \text{ W} . \quad (1)$$

El valor de potencia obtenido involucra solo a la bomba, la cual debe ser arrastrada por la turbina.

El siguiente paso consiste en determinar la performance de una turbina eólica de eje vertical tipo Darrieus-H, girando libremente sin considerar cargas externas. Para ello se procedió a desarrollar un modelo de múltiples fajas de corriente [1].

El modelo es capaz de predecir la potencia total de salida y las cargas aerodinámicas actuantes en las palas. Además puede ser usado para estudiar los efectos de la variación de la geometría tales como solidez de las palas y de la relación altura/radio del rotor. Los datos aerodinámicos del perfil han sido obtenidos de la base de datos aerodinámicos del perfil NACA 0018 (Fig.1) para una variación de números de Reynolds de  $10^4$  a  $5 \times 10^6$ .

Con el objetivo de lograr aproximar los cálculos a valores reales, a la herramienta de cálculo descripta, la cual permitió obtener la performance de una turbina Darrieus-H ideal, se incluyó la contribución de los montantes y cables tensores Figs. 2 y 3.

En un cálculo preliminar se estudió la incidencia de tres geometrías posibles para los montantes:

- Circular ( $\varnothing$ : 42,17 mm)
- Elíptico ( $c/t > 4$ )
- Perfilado (NACA 0018)

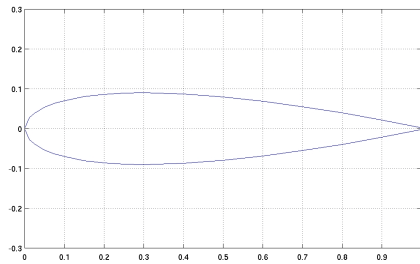


Figura 1. Perfil NACA 0018

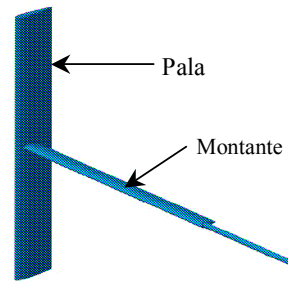


Figura 2. Detalle de la disposición de pala-montante

La tabla N° 1 muestra la potencia absorbida por los 3 montantes de la turbina y los cables tensores, de las tres geometrías estudiadas:

Geometría de la sección del montante	Potencia absorbida (W)
Circular ( $\varnothing_{\text{exterior}}$ : 42,17 mm)	550
Elíptica ( $c/t > 4$ )	160
Perfilada (NACA 0018)	43

Tabla N° 1 Potencia absorbida

De la tabla se deduce que: si bien la sección circular es fácil de conseguir y de bajo costo, ya que es un caño comercial, su utilización es inviable debido a que la turbina reduce drásticamente su eficiencia al utilizar esta geometría en los montantes. Los parámetros que se deben calcular en este segundo paso son la potencia y la cupla entregada por la turbina. Para realizar dicho cálculo se decidió utilizar una turbina de tres palas (Fig. 3) con el propósito de disminuir las vibraciones por la asimetría de carga inducida en la rotación.

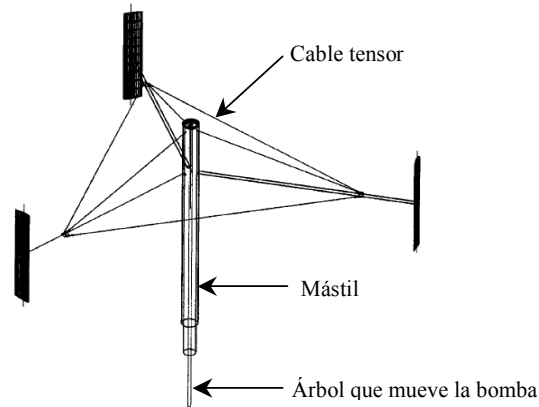


Figura N°: 3 Configuración preliminar

A su vez, en esta instancia se seleccionó una bomba comercial capaz de cumplir con los requerimientos de caudal y altura de elevación establecidos al comienzo de este escrito.

La bomba seleccionada es del tipo “a diafragma”, de la marca comercial “Villa”, la cual posee las siguientes prestaciones:

$$Q=1800 \text{ l/h o } 5 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$$

$$H=15\text{m (elevación)} + 5\text{m (aspiración)}$$

$$\omega= 180 \text{ rpm}^A$$

$$\eta= 0,75$$

$$P_{\text{real}} = \frac{Q \times \gamma \times H}{\eta} = 130.8 \text{ W} \quad (2)$$

Otros datos utilizados para el cálculo se detallan en la Tabla N° 2.

<sup>A</sup> Como la velocidad angular requerida por la bomba es 3 veces superior a la velocidad de la turbina, se introdujo un sistema de poleas entre ambos elementos para lograr aumentar la velocidad entregada por la turbina.

Velocidad de viento de diseño	5 m/s <sup>B</sup>
Velocidad de rotación	60 rpm
Número de palas	3
Largo de las palas	2 m
Cuerda de las palas	0,3 m
Radio de la turbina	3 m
Perfil de la pala	NACA 0018
Carenado de los montantes	elíptico (c/t > 4)
Diámetro de los cables tensores	2 mm

**Tabla N° 2 Datos para el cálculo**

El cálculo arrojó que la potencia teórica máxima es del orden de 200 W. Este valor se consideró apto ya que se deben absorber también las pérdidas mecánicas y caída de eficiencia aerodinámica por efectos tridimensionales, que no fueron tenidos en cuenta.

El segundo parámetro calculado es el torque y se observó que es necesario incluir en la geometría propuesta un sistema que produzca la cupla necesaria para el arranque de la turbina. Una posible solución a este problema es la incorporación de una turbina Savonius.

En función de los resultados obtenidos, se incorpora al diseño original propuesto Fig. 3 dos elementos extras, con el propósito de lograr arranque autónomo de la turbina. Uno de los elementos es un par de Savonius, ubicadas a 90 grados uno con respecto del otro, ref. [2]. Además, como segundo elemento se colocó un embrague centrífugo, el cual permite que la turbina comience a girar sin arrastrar la bomba de agua hasta alcanzar una velocidad de 45 rpm. A partir de allí, la bomba se acopla automáticamente a la turbina para comenzar a bombear agua.

Las dimensiones geométricas de los Savonius se presentan a continuación:

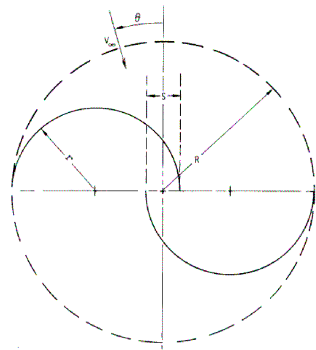
Datos de Savonius propuesto:

r: 0.55 m

s: 0 m

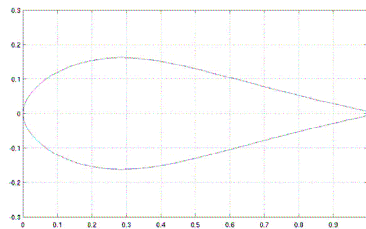
h: 0.90 m

S: 0.99 m<sup>2</sup>

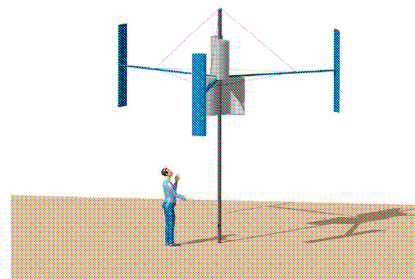


**Figura 4. Vista superior de la disposición de dos Savonius**

Otra modificación realizada al diseño inicial consistió en la adopción de montantes con perfil EPPLER 862 en lugar del perfil elíptico propuesto originalmente. La forma geométrica del perfil se muestra a continuación:



**Figura 5. Perfil EPPLER 862**



**Figura 6. Configuración adoptada**

Finalmente se procede a calcular la potencia y cupla entregada por una turbina a eje vertical combinada, Darrieus-H/Savonius, en condiciones muy aproximadas a la realidad. La Fig. 6 detalla la disposición final de la turbina. El cálculo arrojó que la turbina genera una potencia máxima teórica del orden de 300 W. Al igual que en el caso anterior, este valor se considera apto, ya que además de arrastrar la bomba se deben absorber las pérdidas mecánicas y caída de eficiencia aerodinámica por efectos tridimensionales que no fueron considerados en la modelización. Por otro lado, es importante destacar que las modificaciones realizadas permitieron lograr una cupla de arranque positiva, a la velocidad de viento de

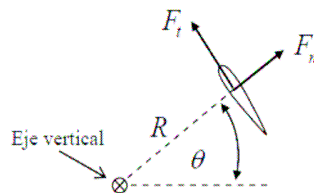
<sup>B</sup> Las estadísticas registradas de vientos en las regiones de los llanos y valles del oeste de la provincia de La Rioja, arrojaron una velocidad media de unos 5 m/s, valor que fue tomado como parámetro para el diseño de la turbina.

diseño, para cualquier velocidad de rotación de la turbina. Finalmente, como último paso, se calcularon las cargas aerodinámicas con el objetivo de dimensionar el mástil de la turbina. Como hipótesis de cálculo se consideró a la turbina con velocidad de rotación cero (caso más desfavorable). Como resultado se obtiene una carga global, horizontal, cuyo punto de aplicación se encuentra a la altura de los montantes.

Por otro lado, se calcularon también las cargas sobre las palas de la turbina. Es importante aclarar que en este caso se presenta una fuerza normal y una tangencial. Bajo este contexto se realizaron dos análisis:

- Un análisis estático (se consideró a la turbina con velocidad de rotación cero) para los cálculos de pandeo de los montantes y las cargas sobre el mástil.-
- Un análisis dinámico (se consideró a la turbina con una velocidad de rotación máxima de 80 rpm) para analizar las cargas originadas por la fuerzas centrifugas.-

La Fig. 7 muestra la disposición de las fuerzas sobre una pala de la turbina. Las cargas totales que aquí se presentan se supondrán uniformemente distribuidas a lo largo de cada pala. En la práctica la velocidad angular es limitada mediante la colocación de un freno centrífugo, el cual se acciona al alcanzar la velocidad de rotación límite.



### RESULTADOS OBTENIDOS

A fin de visualizar y analizar los resultados obtenidos de manera rápida, éstos se encuentran sintetizados en los gráficos que se detallan a continuación.

El Gráfico N° 1 muestra los valores de potencia vs. velocidad de rotación para las diferentes configuraciones de la turbina. En este gráfico se observa que la turbina con palas Darrieus presenta una muy buena performance a altas velocidades, pero es muy deficiente a bajas velocidades.

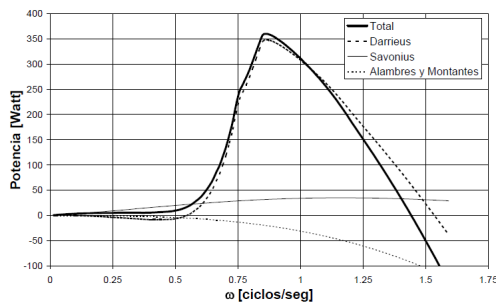


Gráfico N° 1 Potencia vs. velocidad

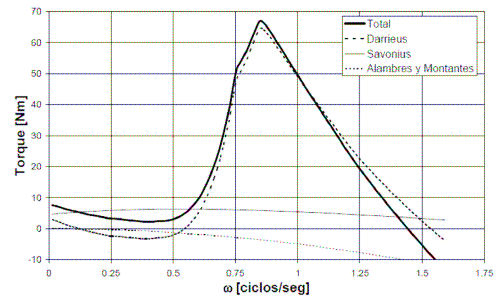


Gráfico N° 2 Torque vs. velocidad

El Gráfico N° 2 muestra los valores de torque vs. velocidad de rotación para las diferentes configuraciones de la turbina. De este gráfico se observa que es necesario incorporar al diseño que solo posee palas de tipo Darrieus un elemento que genere el torque necesario para la puesta en marcha de la turbina, observándose buena coincidencia con los datos aportados por la ref. [3].

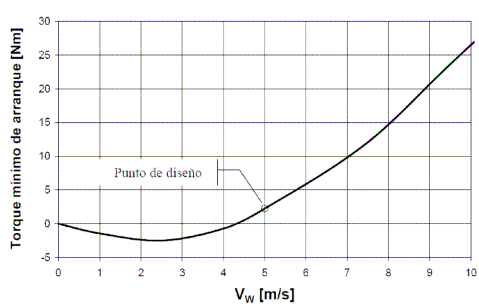


Gráfico N° 3 Torque vs. Velocidad Darrieus

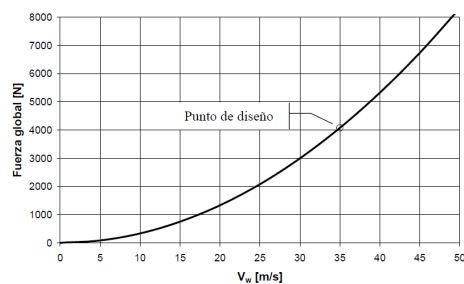


Gráfico N° 4 Fuerza global vs. Velocidad Viento

El Gráfico N° 3 muestra los valores de torque vs. velocidad del viento para la turbina con palas Darrieus. A partir de este gráfico se determina el torque mínimo necesario para lograr la puesta en marcha de la turbina.

El Gráfico N° 4 muestra la variación de la fuerza global sobre la turbina en función de la velocidad del viento. De éste se obtiene el valor de la carga que debe soportar el mástil de la turbina.

Los Gráficos N° 5 y 6 muestran los valores de fuerza normal y tangencial sobre la pala en función de la velocidad del viento.

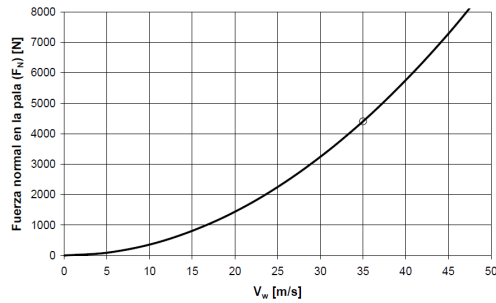


Gráfico N° 5 Fuerza normal vs. Velocidad Viento

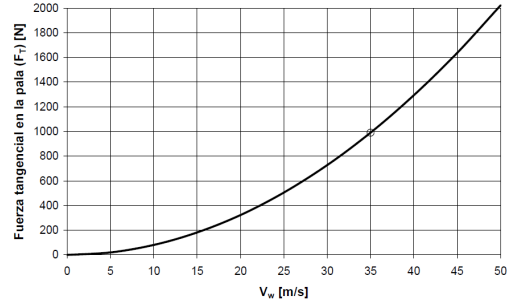


Gráfico N° 6 Fuerza tangencial vs. Velocidad Viento

### CONSTRUCCIÓN, INSTALACIÓN Y EVALUACIÓN DE FUNCIONAMIENTO.

Finalizada la etapa de diseño y cálculos de la turbina, se procedió a construir un prototipo de la misma con el objetivo de validar las prestaciones y realizar las modificaciones necesarias para su buen funcionamiento.

Dos agregados muy importantes tuvo aquí la turbina:

- **Un freno de acción centrífuga con bloqueo.**

Como su nombre lo indica, este freno se activa por fuerza centrífuga cuando la velocidad alcanzada por la turbina supera los límites admisibles tornándose peligrosa para la integridad estructural del equipo. El desbloqueo del sistema se realiza manualmente.

- **Un mecanismo manual de enclavamiento.**

Este mecanismo bloquea la turbina e impide la rotación del mismo cuando se considere que no debe funcionar, ya sea, por la presencia de ráfagas de viento muy elevadas o no se requiera el bombeo de agua, de acuerdo a las recomendaciones de la ref. [4].

Los materiales utilizados para la construcción de la turbina son de bajo costo y fáciles de conseguir en el medio local. Cabe mencionar también, que el equipamiento necesario para la fabricación de las partes no es muy sofisticado, requiriendo para esto: un torno paralelo convencional, una perforadora de banco, una fresadora universal y una máquina de soldar monofásica. Las imágenes que se encuentran a continuación muestran las partes de la turbina.

Las Figs. 8 y 9 detallan la unión entre montante y toma de la pala. Los tornillos con ojo que se observan en la Fig. 5 sirven para fijar los cables tensores.



Figura 8. Unión entre montante y toma de la pala



Figura 9. Unión entre montante y toma de la pala

La Fig.10 muestra uno de los cuatro semi-Savonius que dispone la turbina. Están contruidos con resina y fibra de vidrio, ésto hace que sean de bajo peso y de fácil realización. Por su parte, las Figs. 11, 12 y 13 muestran varias partes de la turbina. El montaje de estos elementos se puede observar en la Fig. 14 que muestra la turbina armada



Figura 10. Semi-Savonius

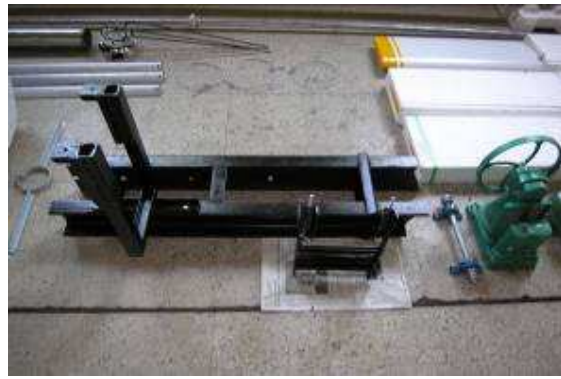


Figura 11. Estructura Base



Figura 12. Freno



Figura 13. Unión rotor-montante



Figura 14. Turbina Prototipo armada.

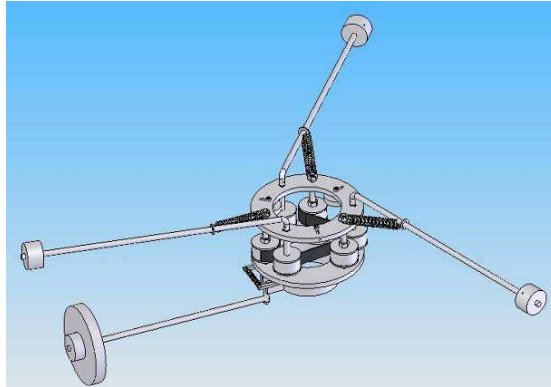
Construido el prototipo, se instaló el mismo en la ciudad de La Rioja, en el predio de la Laguna Azul, siendo este el lugar el seleccionado para la evaluación funcional del dispositivo. La turbina se encuentra fija a la superficie mediante un soporte central que además de impedir la rotación del mástil permite erectarlo durante el montaje. Tres cables de acero, igualmente espaciados y firmemente tensados, fijan espacialmente al mástil. Estos cables se toman al piso mediante soportes de acero empotrados con hormigón armado para soportar eventuales ráfagas de viento. Las Figs 15 y 16 muestran diversas etapas del armado de la turbina.



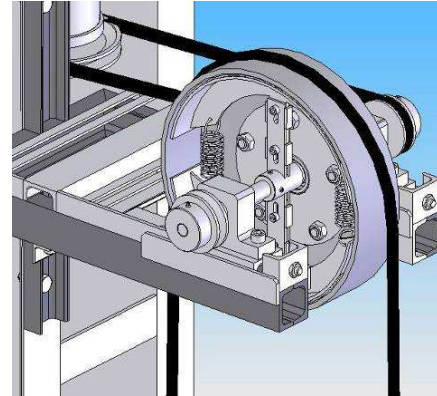
**Figura 15. Montaje**



**Figura 16. Montaje**



**Figura 17. Freno Centrifugo completo**



**Figura 18. Embrague**



**Figura 19. Turbina Prototipo instalada.**

Las Figs. 17 y 18 respectivamente muestran el diseño del freno centrífugo y el embrague de acoplamiento de la carga. Finalmente, la Fig. 19 muestra la turbina completamente armada junto a la Laguna Azul en la ciudad de La Rioja.

## ABREVIATURAS, SÍMBOLOS Y UNIDADES.

TEV: Turbina Eólica a eje Vertical	$c/t$ : Relación de aspecto del perfil
P: Potencia (W)	$\omega$ : Velocidad de rotación (rpm)
Q: Caudal ( $m^3/s$ )	$V_w$ : Velocidad del viento (m/s)
$\gamma$ : Peso específico del fluido a bombear ( $N/m^3$ )	S: Superficie de referencia del Savonius ( $m^2$ )
H: Altura útil de elevación (m)	$F_t$ : Fuerza tangencial (Newton)
$\eta$ : Rendimiento total de la bomba	$F_r$ : Fuerza radial (Newton)

## CONCLUSIONES

Después de haber observado todas las etapas de este proyecto, desde los cálculos hasta la fabricación y puesta en funcionamiento de la turbina, y además, evaluar los resultados obtenidos, se concluye que:

- el software HDAR es una herramienta de cálculo suficientemente precisa para estimar las performances de turbinas verticales tipo Darrieus-H.
- una turbina combinada Darrieus-H/Savonius tiene una excelente eficiencia global comparada con otras turbinas diseñadas para bajas velocidades relativas.

También es importante mencionar que a la fecha, el proyecto se encuentra en etapa de evaluación funcional en la Ciudad de La Rioja. Si bien aun no se han obtenido los valores de las mediciones de cupla y velocidad angular, para luego evaluar la potencia del turbina para diferentes velocidades de viento y contrastar estos resultados con los obtenidos en los cálculos matemáticos y con el software, los resultados obtenidos son muy alentadores ya que el prototipo no solo logro accionar la bomba, cumpliendo los requisitos de caudal y altura de elevación de agua, sino que además soportó vientos de hasta 40 km/h sin sufrir ningún tipo de daño.

## RECONOCIMIENTOS

El presente trabajo ha sido ejecutado con la colaboración desinteresada de los ingenieros Fernando Cagnolo y Carlos Centeno, y de los señores Diego Schalbetter, Rene F. Bustos y Orlando Siles, quienes aportaron técnicamente al mismo. El proyecto ha contado con la financiación conjunta de la Secretaría de Estado de Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva (SECTIP) de la Nación y de la Fundación Ecológica Valle de Huaco.

## REFERENCIAS

- [1] Scarpin Gustavo: *Informe Técnicos N° 1 a 4 - PFIP LAR3-06 Desarrollo de turbina eólica a eje vertical*. Fundación Ecológica Valle de Huaco, documentación interna, 2007.
- [2] Ben F. Blackwell, Robert E. Sheldahl, Louis V. Feltz, "Wind Tunnel Performance Data for Two- and Three-Bucket Savonius Rotors", SAND76-0131, July 1977.
- [3] Brian Kinloch Kirke, "Evaluation of self-starting vertical axis wind turbines for stand-alone applications", Thesis, Griffith University, April 1998
- [4] IEC 1400-2: 1996, Wind turbine generator systems – Part 2: Safety of small wind turbine.

## ABSTRACT

Fundación Ecológica Valle de Huaco has developed a vertical axis wind turbine for direct mechanical shaft power application as a possible solution to the shortage of pumping elements for the accumulation and subsequent treatment of water in isolated settlements in the Province of La Rioja countryside. The project was carried out in three stages. On the premise that the wind turbine should be a vertical axis design, due to its constructive simplicity, lower cost and increased mechanical efficiency compared with a horizontal axis turbine, the first step was to conduct a study on the shape and arrangement of the blades. Once it was defined, the mathematical calculations required for sizing were carried out, including the development of software to simulate the performance of the turbine. This stage ended with the structure calculations and the design of engineering blueprints to manufacture the prototype. The second stage involved the construction of the prototype. The third and last stage was prototype site installation, to evaluate its performance and execute the required adjustments and modifications .

**Keywords:** Vertical axis wind turbine, Darrieus turbine, Savonius turbine.