

Diseño y Construcción de Banco de Pruebas para ensayos de Aerogeneradores de Eje Vertical

Villanueva A., Ganiele M., Montenegro S., Nicoletti P., Quinteros L., Areas P., Melo M., Ponzoni L.

RESUMEN

El diseño y eficiencia de un aerogenerador depende principalmente de las características del viento de la zona donde va a ser instalado, de no considerar este aspecto puede que el mismo funcione solo en ciertos periodos del año o deje de funcionar por completo. Frente a esta problemática, se propone una técnica novedosa a partir del desarrollo de un banco de pruebas, para poder ensayar en un microtúnel de viento modelos en escala de aerogeneradores de eje vertical de baja potencia a diferentes condiciones de viento. Esto permitirá obtener y analizar la curva de funcionamiento de los mismos y realizar los ajustes necesarios en el diseño para maximizar la potencia extraída del aerogenerador.

ABSTRACT

The design and efficiency of a wind turbine depends mainly on the characteristics of the wind in the area where it is to be installed. If this aspect is not considered, it may only work at certain times of the year or stop working completely. Faced with this problem, the development of a test bench is proposed to be able to test models of low-power wind turbines at different wind conditions. This will allow obtaining and analyzing their operating curve and making the necessary design adjustments to maximize the power extracted from the wind turbine.

PALABRAS CLAVE

Aerogenerador, banco de prueba, curva de funcionamiento.

KEY WORDS

Wind turbine, test bench, operating curve.

INTRODUCCIÓN

Varios países de Latinoamérica y en particular Argentina, han suscripto a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo en Argentina, 2018), por lo cual fomentar la obtención de energía eléctrica a partir de fuentes renovables es una de las prioridades en la agenda gubernamental. Las perspectivas de Argentina en materia de energía eólica son francamente alentadoras. Se estima que el potencial eólico patagónico al sur del paralelo 42 encierra una energía decenas de veces mayor al contenido en toda la producción anual argentina de petróleo. Asimismo, existen numerosas regiones aptas en las provincias de Río Negro y Neuquén, en varias zonas serranas y costeras de la provincia de Buenos Aires, y en muchos otros sitios puntuales de todo el país (Secretaría de Energía, 2008).

La Ley 27.191 establece como objetivo de la Segunda Etapa del “Régimen de Fomento Nacional para el Uso de Fuentes Renovables de Energía Destinada a la Producción de Energía Eléctrica” lograr una contribución de las fuentes renovables de energía hasta alcanzar el veinte por ciento (20%) del consumo de energía eléctrica nacional, al 31 de diciembre de 2025. Frente a este contexto, Argentina logró ampliar la participación de energías renovables en su matriz energética del 2% al 8% entre el año 2016 y el 2019. Podemos observar que Argentina apunta en la dirección de disminuir la brecha existente con otros países que se encuentran más avanzados en el uso de tecnologías alternativas limpias para la generación de energía eléctrica. Por lo tanto, siguen activos los esfuerzos por ampliar la participación de las energías renovables en la generación de energía eléctrica nacional.

El diseño y eficiencia de un aerogenerador depende principalmente de las características del viento de la zona a instalar el mismo, además de cuestiones como el tipo de aerogenerador (de Eje Horizontal o Eje Vertical), el tipo de perfil, diámetro, altura, generador eléctrico, transmisión, etc. Sin embargo, gran parte de los desarrollos nacionales de aerogeneradores guían sus esfuerzos en la construcción de la máquina, basando su diseño en la copia de otros aerogeneradores internacionales, y delegando a un segundo plano las características del viento para su diseño. Esto es debido básicamente a la falta de infraestructura y complejidad ingenieril que requiere el desarrollo de este tipo de máquinas, y que muchas veces las Pymes o los fabricantes locales carecen. En consecuencia, muchos diseños no satisfacen las condiciones necesarias para un adecuado funcionamiento, saliendo de funcionamiento por desperfectos de diseño o funcionando sólo en ciertos períodos del año, causando grandes pérdidas para todos aquellos que se benefician de este tipo de tecnologías.

Una forma de mejorar la calidad de los aerogeneradores nacionales, es crear un laboratorio de prueba para que los fabricantes puedan probar sus propios aerogeneradores y analizar algunos parámetros, como su curva de funcionamiento. En este sentido, el Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI) cuenta con el Laboratorio de Medición de

Desempeño de Aerogeneradores de Baja Potencia en la ciudad de Cutral-Có desde el año 2012 y además el año pasado comenzó con el proceso de certificación de instaladores de aerogeneradores de baja potencia.

Desde el laboratorio “Perfil Alar” de la Comisión Nacional de Energía Atómica y junto con la Universidad Nacional de Tres de Febrero se ha conformado un grupo de investigación y desarrollo de Aerogeneradores y Materiales “AeroMat” que se encuentra trabajando en un laboratorio de prueba de aerogeneradores de eje vertical de baja potencia. En el presente trabajo se detallarán los pasos que se realizaron para determinar el diseño y construcción del mismo.

OBJETIVOS

El objetivo del presente trabajo consiste en el diseño y construcción de un banco de pruebas para la obtención de la curva de potencia de aerogeneradores de eje vertical de baja potencia para ser utilizado en un túnel de viento.

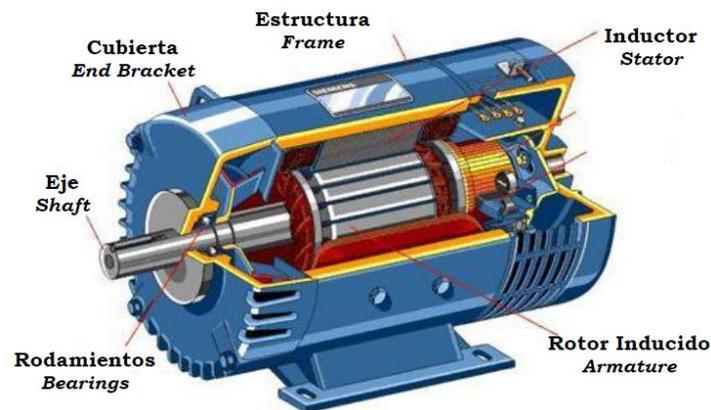
Los objetivos específicos son:

- Poner en funcionamiento un tacómetro para la obtención de velocidades angulares del generador.
- Obtener los datos del momento del generador.
- Utilizar el banco de pruebas en un túnel de viento.
- Obtener la curva característica de aerogeneradores de baja potencia.

MARCO TEORICO

Los motores de corriente continua se componen principalmente de dos partes: inductor y rotor. El inductor es la parte fija, este da soporte mecánico y contiene los polos de la máquina que pueden ser devanados de hilo de cobre sobre un núcleo de hierro o imanes permanentes. El rotor es la parte móvil, generalmente presenta forma cilíndrica, también devanado y con núcleo.

Imagen N°1: Partes principales de un motor de corriente continua.



Fuente: Página Web The Engineering Projects – Technopreneur.

El motor es alimentado con corriente directa mediante un mecanismo que puede o no involucrar escobillas clasificando los motores en brushed o brushless respectivamente. Las escobillas hacen contacto con el conmutador y le entregan una corriente eléctrica que, al pasar a través de los devanados del rotor, crea un campo magnético. Este interactúa con los imanes permanentes ubicados en el estator y generan el movimiento del eje. En cambio, en los motores brushless los devanados se encuentran fijos en el estator y rodean al eje mientras que los imanes permanentes están sobre el eje del motor en el rotor, esto reduce considerablemente la fricción y aumenta la eficiencia del motor.

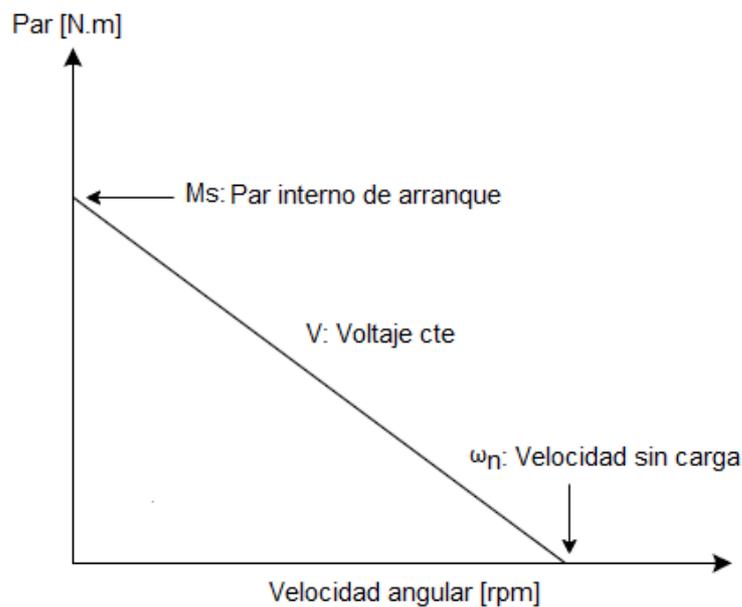
Dependiendo de la forma en que se conecten los devanados que constituyen el estator y el rotor, se distinguen tres tipos de configuraciones:

- Motor en serie: Rotor e inductor conectados en serie. Si se desconecta de los bornes de salida del motor, quedará interrumpido el circuito de excitación y no se producirá en el inducido tensión alguna.
- Motor en paralelo: Rotor e inductor conectados en paralelo. El devanado de campo con muchas espiras de hilo fino, si se compara con la intensidad que fluye por el rotor, se genera una mayor resistencia eléctrica en el estator, y la intensidad que lo atraviesa es prácticamente constante.
- Motor compuesto: Motor cuya excitación es originada por dos bobinados inductores independientes; uno dispuesto en serie con el rotor y otro conectado en derivación con el circuito formado por los bobinados inducidos.

Curvas características

La curva de par-velocidad describe la capacidad de producción de un par estático del motor de corriente continua (DC) respecto al voltaje aplicado y a la velocidad del motor. Para cada motor, hay una curva de par-velocidad específica y una curva de potencia. Las curvas siguientes corresponden a motores de imanes permanentes de corriente continua operados a un voltaje constante.

Imagen N°2: Curva par-velocidad.



Fuente: Elaboración propia.

La Imagen N°2 muestra una curva de par-velocidad de un motor DC típico. Podemos ver la relación inversamente proporcional del par respecto a la velocidad del eje de salida, es decir, existe una compensación entre la cantidad de par que entrega un motor y la velocidad de giro del eje de salida. Las características del motor se dan frecuentemente como dos puntos en este gráfico: el par de parada M_s representa el punto en el gráfico en el que el par es máximo pero el eje no gira, y el otro punto es el de velocidad sin carga ω_n , esta es la velocidad máxima de salida del motor cuando no se aplica torque al eje de salida. Esto es generalmente cierto para los motores DC siempre que la curva represente la salida directa del motor. Si las especificaciones se dan como dos puntos, es seguro asumir una curva lineal.

La curva se aproxima al conectar estos dos puntos con una línea, cuya ecuación se puede escribir en términos de torque o velocidad angular.

$$1) \quad M_{\text{motor}} = \frac{M_s - \omega M_s}{\omega_n}$$

$$2) \quad \omega_{\text{motor}} = \frac{(M_s - M)\omega_n}{M_s}$$

El área debajo de la curva de par-velocidad se puede subdividir en “rectángulos”, los cuales representan las distintas potencias entregadas por el motor. Estas varían según el valor del par motor y la velocidad angular a la que se encuentre operando el motor.

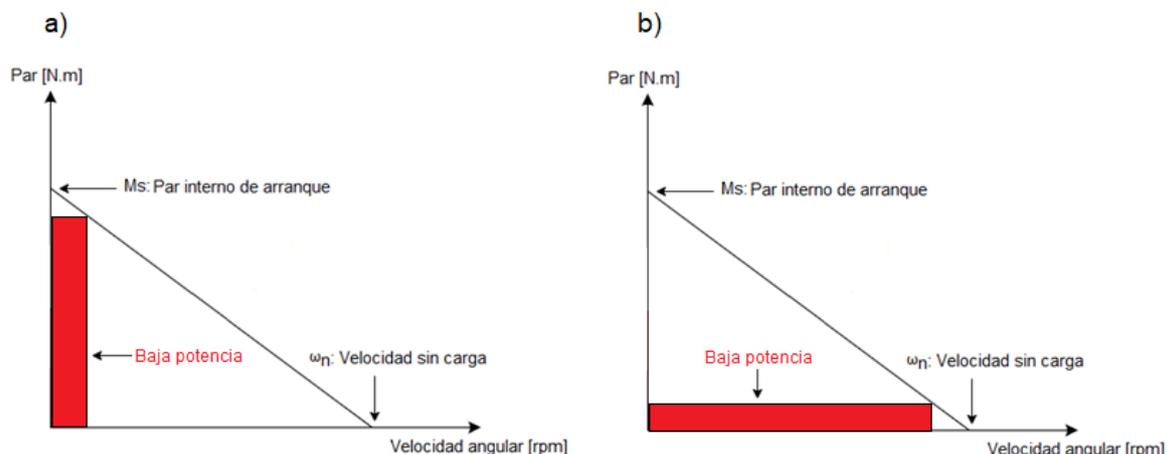
$$3) \quad P = M\omega$$

Donde

- M = momento o par del rotor
- ω Velocidad angular

Teniendo en cuenta esta relación podemos visualizar en los siguientes gráficos que la potencia entregada por el motor presentará valores bajos cuando el torque sea demasiado alto y la velocidad de giro muy baja y, en el otro extremo, cuando el torque sea demasiado bajo y la velocidad de giro muy alta.

Imagen N°3: Curva par-velocidad a baja potencia. a) Alto par de arranque y baja velocidad de giro. b) Bajo par de arranque y alta velocidad de giro.



Fuente: Elaboración propia.

Podemos hallar el punto de máxima potencia obteniendo las ecuaciones de potencia en función del par motor y de la velocidad de giro. Estas ecuaciones se obtienen al reemplazar las ecuaciones 1 y 2 en la ecuación 3.

$$4) \quad P(M) = -\left(\frac{\omega_n}{M_s}\right) * M^2 + \omega_n * M$$

$$5) \quad P(\omega) = -\left(\frac{M_s}{\omega_n}\right) * \omega^2 + M_s * \omega$$

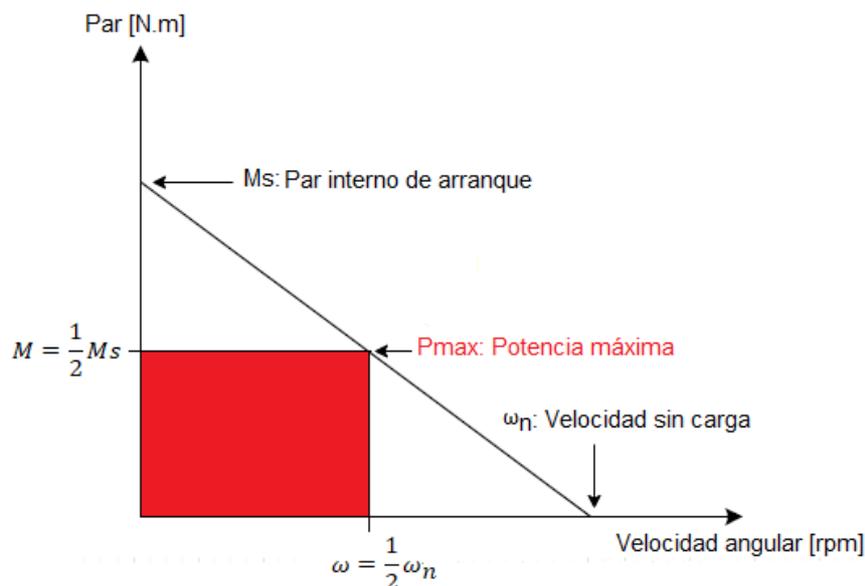
Donde

- M_s = Par interno de arranque
- ω = Velocidad angular sin carga

Derivando las ecuaciones 4 y 5 e igualando a cero hallamos que la potencia máxima ocurre cuando:

$$M = \frac{1}{2} M_s \qquad \omega = \frac{1}{2} \omega_n$$

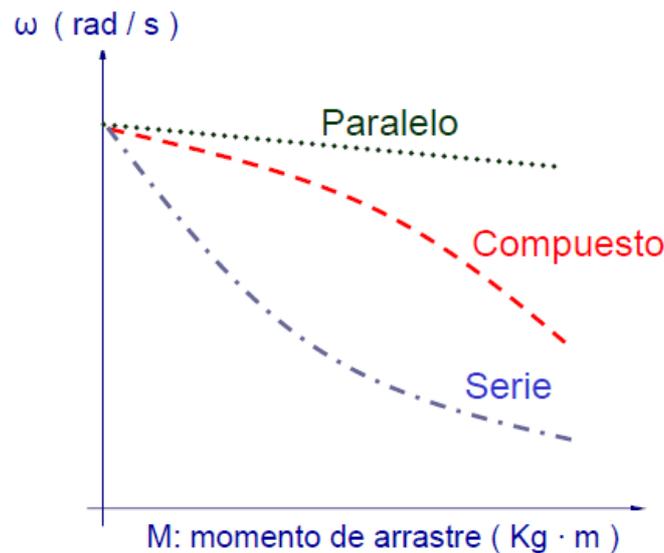
Imagen N°4: Curva par-velocidad a baja potencia. a) Alto par de arranque y baja velocidad de giro. b) Bajo par de arranque y alta velocidad de giro.



Fuente: Elaboración propia.

Si bien las características de interés en el presente trabajo son las de los motores DC de imanes permanentes, ya que este va a ser el empleado en los ensayos, cabe mencionar que la curva característica de un motor se ve ampliamente modificada al tratarse de motores en serie, en paralelo o compuestos.

Imagen N°5: Curva característica velocidad-par de motores en serie, paralelo y compuesto.



Fuente: Elaboración propia.

En cuanto a la curva característica de un aerogenerador, esta esquematiza la relación entre el coeficiente de potencia C_p y la relación de velocidades λ

El coeficiente de potencia representa la fracción de potencia extraída del total disponible en la corriente libre de flujo de aire. Este coeficiente se obtiene adimensionalizando la potencia del rotor por la potencia que proporciona el flujo de aire (a una velocidad no perturbada V_0) a través del área proyectada del rotor en la dirección del flujo (Akwa, Vielmo, & Petry, 2012).

$$6) \quad C_p = \frac{P_{\text{rotor}}}{P_{\text{disponible}}} = \frac{M\omega}{\frac{1}{2}\rho AV_0^3} = \frac{M}{\frac{1}{2}\rho AV_0^2 r} \frac{\omega r}{V_0} = C_M \lambda$$

Donde

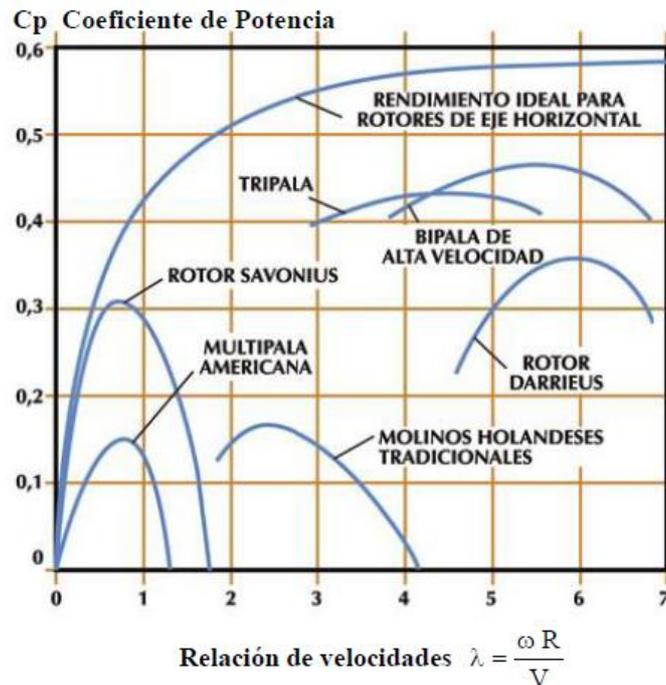
- M = momento del rotor
- ρ = densidad del aire
- A = área del rotor
- V_0 = velocidad del aire no perturbada
- r = radio del rotor
- ω = velocidad angular

- CM = coeficiente de momento

La relación de velocidades establece la relación entre la velocidad tangencial en la punta del álabe y la velocidad del viento.

$$7) \quad \lambda = \frac{\omega r}{V_0}$$

Imagen N°6: Curvas características de Cp promedio en función de λ .



Fuente: Bastianon, 2013.

Semejanza hidráulica

Para realizar los estudios necesarios que nos permitan obtener las curvas características de las turbinas eólicas analizadas, es necesario utilizar la semejanza hidráulica ya que esta nos permite analizar y predecir el funcionamiento de un modelo a escala de aerogenerador, o cualquier otro tipo de equipo, ensayado en un túnel de viento a través de un banco de ensayos y poder extrapolar este análisis a un prototipo de tamaño real.

Para poder garantizar la semejanza hidráulica del modelo y el prototipo se deben garantizar tres tipos de semejanza:

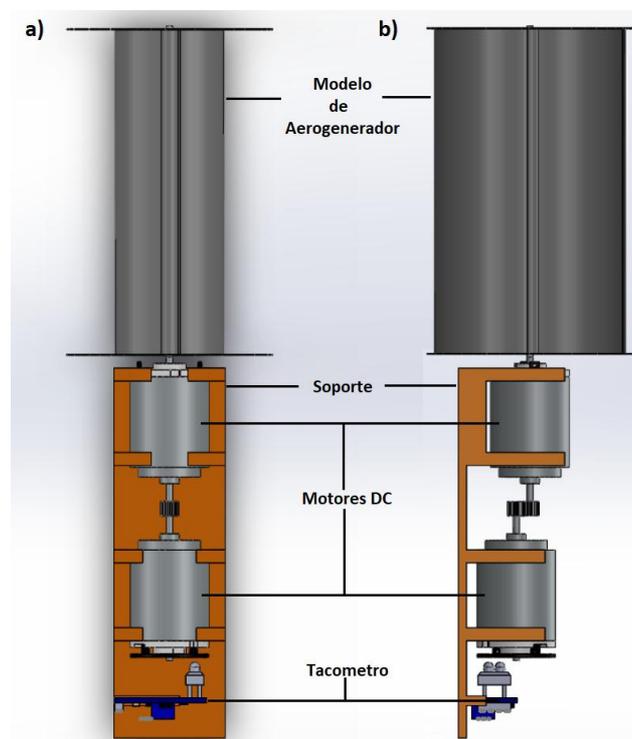
- Semejanza Geométrica: Todas las dimensiones lineales del modelo deben ser proporcionales al prototipo con una diferencia de tamaño representada por un factor de escala.

- Semejanza Cinemática: El perfil de velocidades a lo largo del modelo, tanto en dirección como magnitud, debe ser proporcional al perfil de velocidades del prototipo y a la escala entre ellos. La relación se puede establecer con el parámetro adimensional número de Reynolds.
- Semejanza Dinámica: Las fuerzas que actúan sobre el modelo deben ser proporcionales a las aplicadas sobre el prototipo y, nuevamente, a la escala entre ellos. Esta relación se puede establecer mediante distintos números adimensionales dependiendo del fenómeno que se desea estudiar, por ejemplo, en el caso que no intervengan más fuerzas que las de presión se utilizara el número de Euler.

METODOLOGIA

Para el ensayo y obtención de la curva característica del modelo de aerogenerador a estudiar, se debe imprimir en 3D un modelo del aerogenerador en escala que cumpla con las condiciones de Semejanza Hidráulica durante su prueba dentro del túnel de viento, como se muestra en la Imagen 7.

Imagen N°7: Esquema banco de ensayos y acople al modelo de aerogenerador. a) De frente b) De perfil.



Fuente: Elaboración propia.

Al modelo de aerogenerador impreso en 3D se conectará el banco de pruebas que consta de un motor conectado en forma directa al eje del aerogenerador de manera tal de obtener un

sincronismo entre ambos. En particular, el motor que se acoplará es el modelo C8980-60097 de corriente continua, comúnmente empleado en impresoras. El mismo funciona a voltajes de entre 12-18 V y presenta las dimensiones descritas en la Imagen N°8.

Imagen N°8: Motor DC C8980-60097.

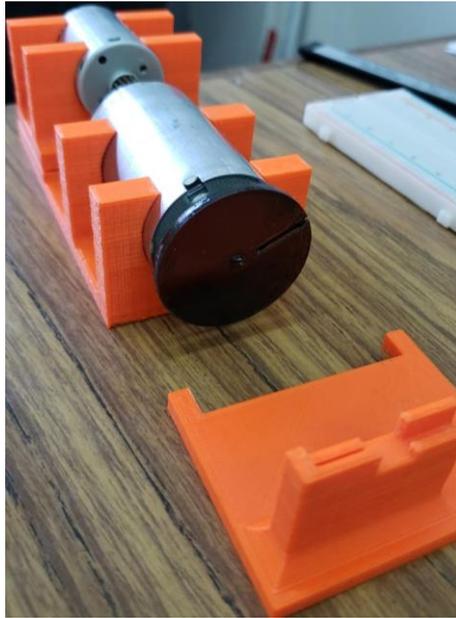


Fuente: Ficha técnica.

Para la construcción del banco de ensayos, se diseñó un soporte mediante impresión 3D el cual consiste de dos partes:

- La primera parte está compuesta por dos motores de imanes permanentes conectados por medio de sus rotores. De esta manera, al proporcionarle corriente a uno de ellos se produce el movimiento del otro, que en esta disposición funciona como generador y del cual se van a obtener los datos necesarios para la construcción de las curvas de potencia vs velocidad angular.
- La segunda parte, está compuesta del soporte donde se colocará el sensor a utilizar para medir la velocidad angular del generador.

Imagen N°9: Soporte para prueba de motores.



Fuente: Elaboración propia.

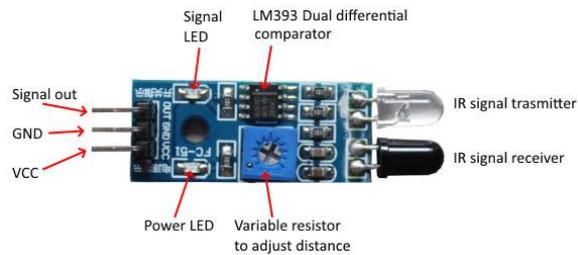
Puesta en marcha de los sensores analizados

Para realizar el análisis de medición de velocidad angular en rpm, se probaron dos tipos de sensores con una placa microcontroladora Arduino Uno y se calcularon una serie de parámetros estadísticos para verificar la eficiencia de cada uno y así seleccionar el más adecuado para el trabajo. Este análisis será detallado en el apartado de resultados y discusión. Se analizó el funcionamiento de dos módulos: el módulo sensor de infrarrojos IR FC-51 y el módulo óptico TCRT5000.

Módulo IR FC-51

El sensor infrarrojo de proximidad IR FC-51 cuyo módulo, en el que se encuentra incorporado, se puede observar en la Imagen N°10. Este es capaz de medir proximidad ya que está compuesto por un transmisor que emite energía infrarroja IR y un receptor que detecta la energía IR reflejada por la presencia de cualquier obstáculo en la parte frontal del módulo.

Imagen N°10: Módulo con sensor IR FC-51.



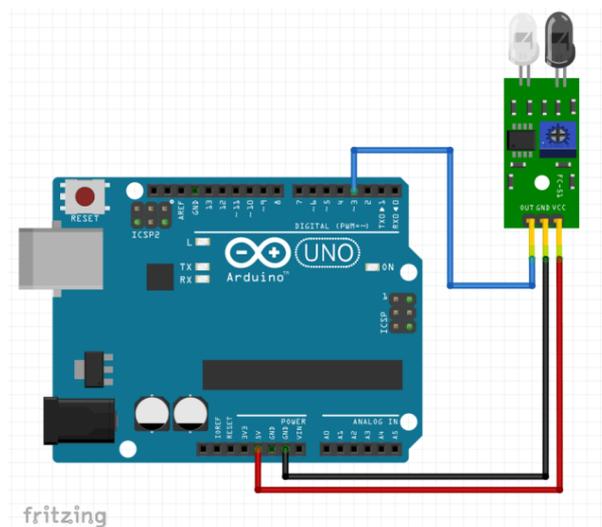
Fuente: Ficha técnica.

Como puede observarse en la Imagen 10, el sensor tiene tres pines de conexión:

- 1) Pin digital.
- 2) Pin Ground o “a tierra”.
- 3) Pin de alimentación.

En el circuito se conectará la salida digital del sensor al pin 3 del Arduino uno, el pin de tierra al Ground y el de alimentación a la alimentación de 5 V. Como consecuencia, se tendrá un sistema ya montado y listo para programar.

Imagen N°11: Circuito IR FC-51.



Fuente: Elaboración propia mediante el Software Fritzing.

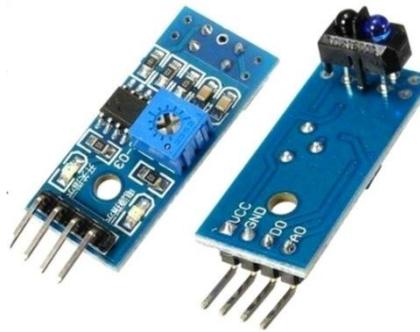
Para analizar el caso de este sensor, se colocó una pequeña varilla en la ranura diseñada en el disco acoplado al eje del generador. El sensor se colocó enfocando a esta varilla por lo cual cada vez que el sensor la identifica, se calculan intervalos de tiempo (ΔT) para cada giro. Estos intervalos son reemplazados en la siguiente ecuación que nos permite obtener la velocidad angular (ω) del generador.

8)
$$\omega(t) = \frac{60}{\Delta T} \text{ [rpm]}$$

Módulo TCRT5000

En el segundo caso, se utilizó un sensor óptico reflectivo TCRT5000, cuyo módulo donde se encuentra incorporado se puede observar en la Imagen N°12.

Imagen N°12: Módulo con sensor TCRT5000.



Fuente: Ficha técnica.

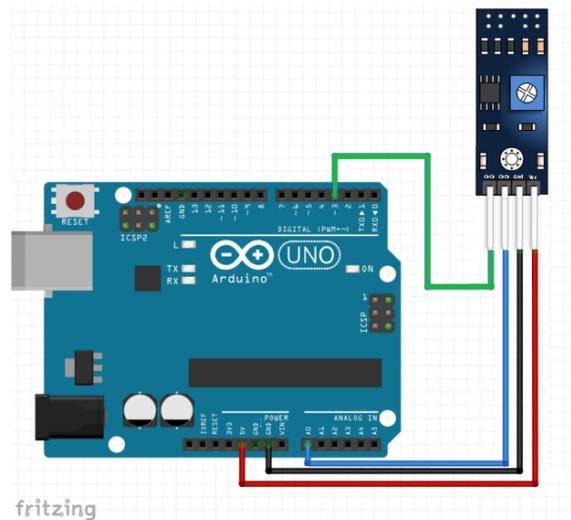
El funcionamiento del mismo se basa en la emisión de luz infrarroja mediante un fotodiodo, la cual es reflejada por una superficie y captada por un fototransistor. La señal recibida por el fototransistor dependerá de las características reflectivas de la superficie, obteniendo así valores bajos si la superficie es reflectiva y altos de no serlo.

Como se puede observar en la Imagen N°12, el sensor tiene cuatro pines de conexión:

- 1) Pin digital.
- 2) Pin Analógico.
- 3) Pin Ground o “a tierra”.
- 4) Pin de alimentación.

En el circuito se conectará la salida digital del sensor al pin 3 del Arduino uno, el pin analógico a una de las entradas analógicas, en esta caso se utilizó la entrada “AO”, el pin de tierra al Ground y el de alimentación a la alimentación de 5 V. Al finalizar la conexión, ya se tiene todo listo para programar.

Imagen N°13: Circuito TCRT5000.



Fuente: Elaboración propia mediante el Software Fritzing.

El disco acoplado al eje del generador fue diseñado de manera que se obtenga un cambio en la señal en cada giro, es por eso que se utilizó un disco negro ya que la reflectividad es muy baja y una franja blanca para que la reflectividad sea mayor. Como en el caso anterior, cada vez que el sensor identifica la franja blanca se calculan los intervalos de tiempo (ΔT) por cada giro. Estos intervalos son utilizados en la ecuación 8 que nos permite calcular la velocidad angular.

Código

Para el funcionamiento de los sensores, se debe escribir un código en el entorno de desarrollo para poder indicarle al microcontrolador lo que queremos que realice: detección de la varilla o franja reflectiva, cálculo del intervalo de tiempo entre cada detección del elemento y cálculo de la velocidad angular.

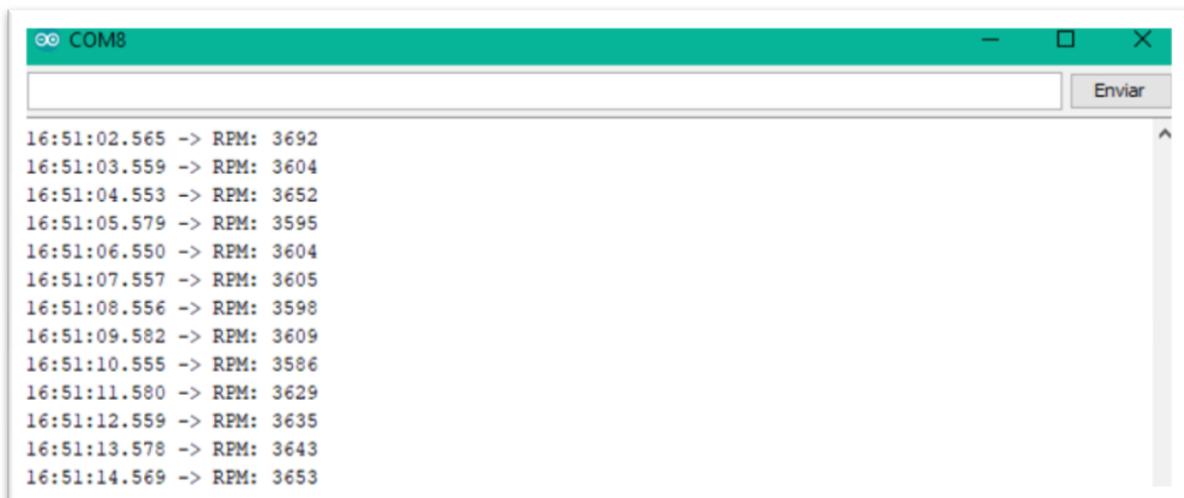
El código fue escrito de manera tal que, al haber un cambio en el registro del sensor, ya sea la detección de la varilla del sensor de proximidad o la franja reflectiva en el caso del sensor óptico, se comience a calcular el tiempo en que el eje del generador da el giro, es decir, hasta que el sensor realiza la próxima detección. Luego, se añadió una sección en la cual estos intervalos son reemplazados en la ecuación 8 de velocidad angular y la pantalla nos indica el resultado. Debido a que los códigos son muy similares, solo se mostrará, a modo de ejemplo, el código desarrollado para el sensor de proximidad IR FC-51 y los resultados que nos entrega el mismo.

Imagen 14: Programación de sensor TCRT5000.

```
volatile byte RPMcontador;  
unsigned int RPM;  
unsigned long tiempoAtras;  
  
void funcionRPM()  
{  
  RPMcontador++;  
}  
  
void setup() {  
  Serial.begin(57600);  
  
  attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(3),funcionRPM, RISING);  
  RPM=0;  
  tiempoAtras=0;  
}  
  
void loop()  
{  
  delay (1000);  
  
  RPM=(30*1000)/ (millis () - tiempoAtras) * RPMcontador;  
  tiempoAtras=millis();  
  RPMcontador=0;  
  
  Serial.print("RPM: ");  
  Serial.println(RPM);  
  attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(3),funcionRPM, RISING);  
}
```

Fuente: Elaboración propia mediante el Entorno de Desarrollo Arduino.

Imagen N°15: Resultados arrojados por el sensor TCRT5000.



Fuente: Elaboración propia mediante el Entorno de Desarrollo Arduino.

Obtención de la Curva Potencia-Velocidad angular

Para la puesta en marcha del banco de ensayos, se alimentará a uno de los motores con una fuente, la cual nos permite variar tanto los valores de corriente (I) como de voltaje (V). Para la obtención de la curva, se mantendrá constante el voltaje y, teniendo los valores de ambas variables, se podrán calcular las distintas potencias eléctricas generadas.

9)
$$P = V \cdot I [W]$$

Los datos obtenidos nos permiten graficar una curva de potencia eléctrica generada en función de la velocidad angular obtenida por parte de los sensores.

Obtención curva Par-Velocidad angular

Para el cálculo del momento, se deberá colocar una polea en el eje del generador con un determinado peso en el extremo. Sabiendo que para una fuerza de magnitud F cuya línea de acción está a una distancia perpendicular l de un punto O, el par generado es

10)
$$M = F \cdot l$$

En este caso, la distancia l será el radio de la polea y se modificará el peso en el extremo para calcular los momentos generados en distintas condiciones. En cuanto a la velocidad angular, la metodología para su cálculo fue la descrita anteriormente.

Los datos obtenidos nos permitirán graficar una curva de momento en función de la velocidad angular.

RESULTADOS Y DISCUSION

En principio, el desarrollo realizado en este trabajo demuestra que es factible realizar un banco de ensayo para probar aerogeneradores a escala dentro de un microtúnel de viento, utilizando componentes Arduino y un motor DC.

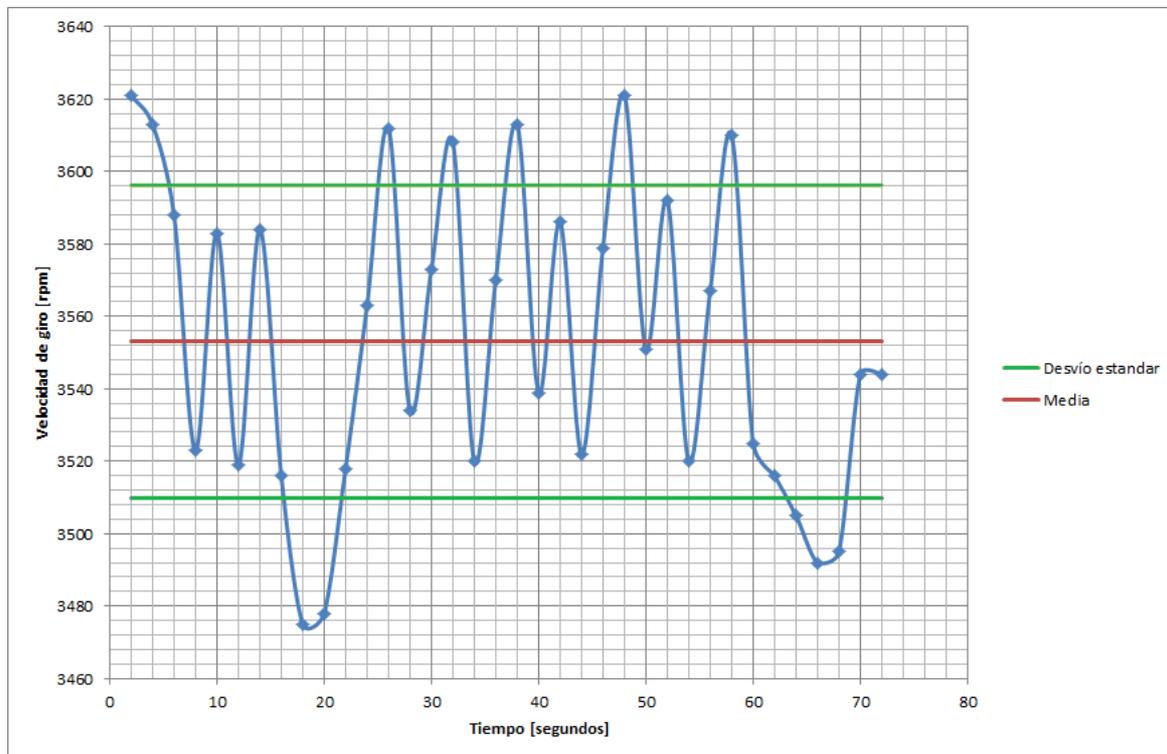
Respecto al sensor IR FC-51, su distancia de detección es de entre 2 a 30 cm, para los fines de este trabajo se utilizó una distancia de 2 cm respecto del motor. Se hicieron cinco mediciones cumpliendo las mismas condiciones de trabajo y luego se calcularon los siguientes resultados estadísticos.

Tabla N°1: Resultados módulo IR FC-5L.

Medición	1 [RPM]	2 [RPM]	3 [RPM]	4 [RPM]	5 [RPM]
Media	3.647,81	3.627,60	3.622,05	3.614,27	3.553,05
Mediana	3.657,00	3.620,00	3.623,50	3.614,50	3.547,50
Moda	3.657,00	3.586,00	3.624,00	3.566,00	3.621,00
Varianza	827,96	1.750,14	1.306,29	1.077,56	1.866,28
Desvío estándar	31,22	41,83	36,14	32,83	43,20

Fuente: Elaboración Propia.

Imagen N°16: Media (rojo) y desvío estándar (verde) módulo IR FC-5L.



Fuente: Elaboración propia mediante el Software Excel.

Los resultados obtenidos indican una fluctuación en los valores de desvío estándar variando este en un rango de valores de 31,22 a 43,2 rpm.

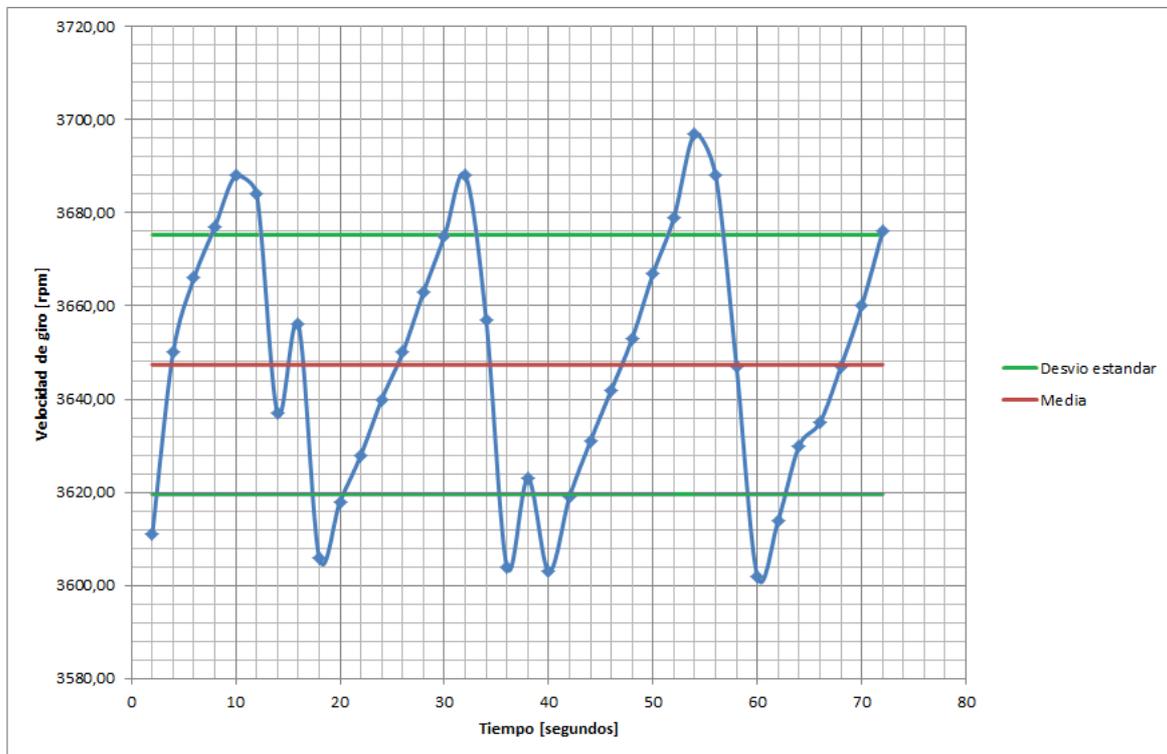
En cuanto al sensor TCRT5000, su distancia de detección es de entre 2,5 a 5 mm. Se realizaron mediciones a una distancia de 2,5 mm respecto a la superficie reflectiva. Nuevamente se hicieron cinco mediciones cumpliendo las mismas condiciones de trabajo y se obtuvieron los siguientes resultados estadísticos.

Tabla N°2: Resultados módulo TCRT5000.

Medición	1 [RPM]	2 [RPM]	3 [RPM]	4 [RPM]	5 [RPM]
Media	3.647,81	3.643,54	3.631,57	3.650,65	3.647,42
Mediana	3.657,00	3.649,00	3.635,00	3.651,50	3.648,50
Moda	3.657,00	3.649,00	3.642,00	3.681,00	3.688,00
Varianza	827,96	748,92	741,71	770,48	776,37
Desvío estándar	28,77	27,37	27,23	27,76	27,86

Fuente: Elaboración propia.

Imagen N°17: Media (rojo) y desvío estándar (verde) módulo TCRT5000.



Fuente: Elaboración propia mediante el Software Excel.

Los resultados obtenidos evidencian una variación en los valores de desvío estándar en el rango de 27,23 a 28,77 rpm lo cual nos indica una medición más confiable respecto al sensor FC-51.

A raíz de los resultados obtenidos, se consideró utilizar el módulo sensor TCRT5000 ya que si bien los rangos de variación en el desvío estándar son similares en ambos sensores, en este último son más constantes y de menor variabilidad.

CONCLUSIONES

Este trabajo demuestra que es posible realizar un banco de ensayos con motores DC de impresoras y sensores acoplados para la prueba de aerogeneradores en escala dentro de un microtúnel de viento, logrando resultados óptimos para este tipo de ensayos. En particular, se logró poner en funcionamiento dos tipos de sensores de velocidad angular o tacómetros, elemento central para la obtención de datos de las velocidades angulares del aerogenerador, y definir cuál es el más adecuado para esta aplicación.

Según los resultados obtenidos, se pudo inferir que la metodología empleada para realizar el banco de ensayos podrá ser utilizada en un túnel de viento para la prueba de modelos de aerogeneradores. Para este tipo de pruebas, se deberá colocar el modelo de aerogenerador impreso en 3D dentro de un túnel de viento y acoplarlo al eje del generador eléctrico. De esta manera, se podrán realizar ensayos a distintas velocidades de viento dependiendo de las características de la zona donde el fabricante del modelo desee instalar el prototipo. Luego, se obtendrá la curva de potencia del modelo mediante el cálculo de las potencias generadas en relación a las velocidades, resultados que serán luego extrapolados al prototipo a partir de las leyes de semejanza hidráulica.

Se plantea como trabajos futuros a realizar una vez superado el contexto actual:

- Instalar sistema de poleas para la determinación del par del generador.
- Ensayo con modelos a escala de aerogeneradores utilizando el banco de pruebas para obtener la curva de funcionamiento.
- Verificar el correcto funcionamiento del banco de ensayos y definir las posibles mejoras.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Lucio G., Ponzoni L., Ganiele J., Tripodi R., Montenegro S., Daverio N., Moreno M., Arcone D., Pereira M. (2019). Design and manufacturing of a system that generates renewable energy from a permanent magnet generator. Modern Environmental Science and Engineering-(ISSN 2333-2581) USA. pp 827-836.
- [2] Ganiele M., Ponzoni L. (2019). Creación de un mapa de vientos, para evaluar el potencial eólico en el campus de Villa Lynch de la Universidad Nacional de Tres de Febrero (UNTREF) - Buenos Aires, Argentina. ISBN 978-620-0-02709-2- Editorial Académica Española.

- [3] Tripodi R., Ponzoni L., Cowes D. (2019). Diseño y construcción de un generador sincrónico de imanes permanentes: Generación de energía renovable para aerogeneradores de baja potencia Buenos Aires, Argentina. ISBN 978-620-0-02709-2- Editorial Académica Española.
- [4] Larsen, K. (2009). Recycling Wind. Recuperado el 13 de Noviembre de 2018, de Traducción propia: <http://www.renewableenergyfocus.com/view/319/recycling-wind/>
- [5] Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. (s.f.). Objetivo 7: Energía asequible y no contaminante. Recuperado el 13 de Noviembre de 2018, de <http://www.undp.org/content/undp/es/home/sustainable-development-goals/goal-7-affordable-and-clean-energy.html>
- [6] Secretaría de Planeamiento Energético Estratégico. (2016). Escenarios Energéticos 2025. Buenos Aires: Ministerio de Energía y Minería.
- [7] The Office of Energy Efficiency and Renewable Energy. (s.f.). The Inside of a Wind Turbine. Recuperado el 12 de Noviembre de 2018, de <https://www.energy.gov/eere/wind/inside-wind-turbine-0>
- [8] Life Cycle Assessment of offshore and onshore sited wind farms. Elsam Engineering. Vestas Wind Systems A/S. Octubre de 2004.
- [9] Life Cycle Assessment of Electricity Production from a Vestas V112 Turbine Wind Plant. PE North West Europe ApS. Vestas Wind Systems A/S. Febrero de 2011.
- [10] Página oficial del Instituto Nacional de Tecnología Industrial. Link: <https://www.inti.gob.ar/noticias/21-asistencia-regional/1587-ya-rige-la-primera-certificacion-de-instaladores-de-aerogeneradores-de-baja-potencia>
- [11] Página oficial de la Asociación Argentina de Energía Eólica. Link: <https://argentinaeolica.org.ar/novedades/inti-neuquen-prueba-aerogeneradores-en-cutral-co-1>
- [12] Bastianón R.A. (2013). Energía del viento y diseño de turbinas eólicas. Ed. Dunken.