

## **DESARROLLO DE UN AEROGENERADOR DE TRES PALAS PARA USO DIDÁCTICO**

**Gisela Marina Alvarez y Alvarez**, Facultad de Ingeniería Universidad Nacional del Nordeste,  
giselaalvarez@alvarez@yahoo.com.ar

**Adrián Roberto Wittwer**, Facultad de Ingeniería Universidad Nacional del Nordeste,  
a\_wittwer@yahoo.es

**Mario De Bortoli**, Facultad de Ingeniería Universidad Nacional del Nordeste,

**Basterra, José Leandro**, Facultad de Ingeniería Universidad Nacional del Nordeste,  
jbasterra@ing.unne.edu.ar

**Veroli, Cesar Gustavo**, Facultad de Ingeniería Universidad Nacional del Nordeste,  
gveroli@yahoo.com.ar

**Franco Gabriel Milich** Facultad de Ingeniería Universidad Nacional del Nordeste,  
francomilich@hotmail.com

**Mauricio Lucas Chuaire**, Facultad de Ingeniería Universidad Nacional del Nordeste,  
mauricio\_chuaire@hotmail.com

**Resumen**— El empleo de aerogeneradores en nuestro país se ha ido incrementando en los últimos años debido a que permite la obtención de energía generando un menor costo ambiental. Por este motivo se han impulsado distintos programas destinados a fomentar el estudio, desarrollo y divulgación de la tecnología vinculadas a esta energía renovable.

El propósito de este trabajo es la utilización didáctica de un modelo a escala de un generador eólico de tres palas de eje horizontal. El aerogenerador fue diseñado teniendo en cuenta aspectos aerodinámicos, criterios de semejanza entre modelo-prototipo y construido, prácticamente en su totalidad, empleando la técnica de impresión 3D de las componentes. Posee un sistema que permite variar el posicionamiento relativo de las palas con relación a la dirección del viento incidente, un sistema para el control de velocidad y para la generación de energía eléctrica se utilizó un motor de corriente continua.

Con el objetivo de aumentar el interés en los alumnos y obtener una mejora general en la calidad de la enseñanza se plantean prácticas de laboratorios con alumnos de las carreras de ingeniería mecánica y electromecánica de la Universidad Nacional del Nordeste (UNNE). Las prácticas consisten en el análisis del comportamiento aerodinámico y la performance de las palas en el proceso de obtención de energía. De manera preliminar, el modelo se ensayó en el túnel de capa límite Jacek Gorecki de la Facultad de Ingeniería de la UNNE con dos velocidades de viento incidente; 5,26 m/s y 6,76 m/s y se evaluaron los parámetros adimensionales TSR y número de Reynolds.

Esta experiencia preliminar ha tenido resultados satisfactorios verificando el correcto funcionamiento del modelo y consiguiendo aumentar la motivación y el nivel de adquisición de conocimientos del alumnado. La realización de estas prácticas de laboratorios pretende además concientizar a las generaciones futuras acerca de la importancia del empleo de energías renovables.

**Palabras clave**— *Mecánica de los fluidos, aerogenerador, didáctica.*

## **1. Introducción**

El propósito del trabajo es generar una propuesta de una práctica de laboratorios en la asignatura Mecánica de los Fluidos empleando un aerogenerador de tres palas. La cátedra Mecánica de los Fluidos se dicta en el segundo cuatrimestre del tercer año de las carreras de Ingeniería Mecánica y Electromecánica en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del Nordeste (UNNE). A partir del segundo año de estas carreras los alumnos comienzan a tener las asignaturas tecnológicas básicas, y resulta conveniente vincular los conceptos teóricos que se desarrollan en estas asignaturas; con temas que nos conciernen a todos, como lo es el empleo de las energías renovables.

A la hora de plantear nuevas estrategias de enseñanza, se presentan inconvenientes como por ejemplo la demanda de mayor cantidad de tiempo, razón por la cual en muchos casos no podrían ser usadas, dada la extensión de los programas que se deben cubrir. Pero a diferencia de las metodologías didácticas más tradicionales, en las que el estudiante tiene el rol pasivo de repetidor de información, las estrategias como el desarrollo de un proyecto o el análisis de casos, no sólo permiten el aprendizaje de contenidos conceptuales, sino que, además, involucran la utilización de estos conocimientos y el desarrollo de habilidades y capacidades necesarias en la vida profesional. Por consiguiente, sostener que estas estrategias demandan mayor tiempo es falaz: por un lado, porque este mayor tiempo conlleva la producción de aprendizajes no contemplados en las metodologías tradicionales, y por otro, porque con los métodos activos, aun los aprendizajes de contenidos conceptuales resultan más efectivos en términos de capacidad de movilización de los mismos ante las situaciones adecuadas y, por ende, en términos de transferencia a situaciones nuevas [1].

Según la Propuesta de estándares de segunda generación para la acreditación de carreras de ingeniería elaborada por el Consejo Federal de Decanos de Ingeniería (CONFEDI) [2] un graduado de una carrera de ingeniería debe poseer una adecuada formación científica, técnica y profesional que lo habilite para aprender y desarrollar nuevas tecnologías, con actitud ética, crítica y creativa para la identificación y resolución de problemas en forma sistémica, considerando aspectos políticos, económicos, sociales, ambientales y culturales desde una perspectiva global, tomando en cuenta las necesidades de la sociedad. Por este motivo, el empleo de esta estrategia didáctica en la cátedra de Mecánica de los Fluidos apunta a incentivar al alumno a investigar y establecer la metodología a seguir durante la práctica, promoviendo el aprendizaje colaborativo de una temática actual.

Esta propuesta de didáctica pretende generar espacios de aprendizaje enriquecidos y actividades que involucren a los estudiantes en la construcción activa de conocimientos para lograr un aprendizaje significativo. Según, Díaz Barriga [3] para que un aprendizaje sea significativo el alumno debe relacionar de manera sustancial la nueva información de sus conocimientos y experiencias previas. Plantea que el conocimiento es parte y producto

de la actividad y el contexto para el aprendizaje. Pero para ello es fundamental la predisposición del aprendiz por aprender significativamente y que el docente desarrolle una propuesta didáctica que capte la atención del alumno, por eso se optó por el tema de aerogeneradores que permitirá al alumno, por un lado poner en práctica los conceptos teóricos desarrollados en la asignatura y por otro, generar conciencia en el uso responsable de la energía para la sostenibilidad de nuestro planeta.

Siguiendo con los rasgos de un buen aprendizaje descriptos por Pozo [4] la práctica debe adecuarse a lo que se tiene que aprender, las actividades propuestas por el docente deben diseñarse para promover este aprendizaje, en vez de recurrir a un aprendizaje memorístico y repetitivo y por esto se plantea un rol activo de los estudiantes, en el cual ellos sean los protagonistas desde el planteo de la metodología, realización del ensayo, elaboración del informe y presentación. En esta práctica, resulta clave el rol del orientador de los distintos grupos, que será el responsable de mostrarse abierto a las inquietudes de los alumnos, sensible a sus necesidades y problemas, de manera tal de conseguir el máximo aprovechamiento de las potencialidades de los mismos.

## **2. Competencias, objetivos y contenidos a desarrollar con la práctica**

La estrategia didáctica apuntará al desarrollo de las siguientes competencias consideradas por el CONFEDI [5] como básicas: el pensamiento crítico, competencias comunicativas, habilidades para identificar, formular y resolver problemas de ingeniería, desempeñarse de manera efectiva en equipos de trabajo, utilizar de manera efectiva las técnicas y herramientas de la ingeniería, ser capaz de administrar en el tiempo los recursos humanos, físicos y tecnológicos para el cumplimiento de lo planeado, competencia para actuar con ética, responsabilidad profesional y compromiso social, considerando el impacto económico, social y ambiental de su actividad en el contexto local y global.

Como objetivos se plantean que los alumnos puedan: adquirir la capacidad de realizar el análisis del comportamiento aerodinámico de un aerogenerador eólico de tres palas; realizar la práctica de laboratorio, tomando decisiones y resolviendo cuestiones organizativas referidas a la práctica trabajando en equipo; vincular o relacionar los conceptos teóricos vistos con la práctica desarrollada; realizar un análisis crítico, bien fundamentado de la experiencia y concientizar a los alumnos acerca de la importancia del empleo de energías renovables.

Los contenidos de la asignatura a abordar con esta práctica son; Ecuación de Bernoulli: presión estática, de estancamiento y dinámica; medición de velocidades en escurrimientos; perfiles de velocidad media y descripción del movimiento de los fluidos; balance de energía en un volumen de control; Análisis dimensional: Números adimensionales para la evaluación de aerogeneradores.

## **3. Actividades propuestas**

La práctica se desarrollará en forma grupal a lo largo del cuatrimestre en que se dicta la asignatura y consta de tres partes.

En una primera parte, mediante la modalidad de aula invertida que ya se emplea en la cátedra [6], se plantea una introducción de los conceptos teóricos y lineamientos básicos para realizar la práctica de laboratorio. Los alumnos deberán desarrollar, a partir de los objetivos generales del ensayo, las planillas de ensayos y los pasos o metodología a seguir para la obtención y posterior procesamiento de los resultados. En esta modalidad de

enseñanza el alumno desarrolla parte del proceso de aprendizaje fuera del aula, favoreciendo el desarrollo autónomo de procesos cognitivos, promoviendo el pensamiento crítico, la interacción y la comunicación en pos de un aprendizaje significativo. Debnath et al [7], sugieren que la enseñanza de materias de las carreras de ingenierías sería más efectiva si los alumnos tuvieran la oportunidad de acceder a los conceptos o fundamentos teóricos antes de asistir a la clases presenciales. De esta manera el profesor puede optimizar el tiempo de clases deteniéndose en los conceptos fundamentales, en el planteo de trabajos de aplicación de los temas desarrollados en el aula invertida y contestar dudas que hayan surgido del estudio previo. Los alumnos, también obtienen ventajas en términos de tiempo, porque regularán el avance de la clase invertida, dependiendo de sus capacidades de aprendizaje.

En una segunda parte se realiza la práctica de la Laboratorio consistente en el ensayo del modelo de aerogenerador bajo condiciones de viento controladas, en la determinación del perfil de velocidades a sotavento y a barlovento del aerogenerador, y en la evaluación del comportamiento del aerogenerador para distintas posiciones de las aspas, con viento incidente uniforme y a distintas velocidades, mediante la lectura de RPM, tensión y corriente para las distintas velocidades de viento incidente.

Finalmente, en la tercera parte, los alumnos elaboran un informe del laboratorio, detallando brevemente los conceptos teóricos empleados, la metodología seguida, acompañada de un registro fotográfico y de las mediciones obtenidas. Realizaran una memoria del procesamiento de los datos, presentaran los resultados obtenidos y las conclusiones finales. Este trabajo se entrega por escrito y posteriormente se realiza una breve presentación de la experiencia de manera grupal.

#### **4. Práctica de laboratorio**

Para la práctica de laboratorios se emplea un aerogenerador de 3 palas construido, prácticamente en su totalidad, mediante la técnica de impresión en 3D. El perfil fue diseñado teniendo en cuenta aspectos aerodinámicos, criterios de semejanza entre modelo-prototipo. Se optó por un perfil aerodinámico tipo NACA 4412 para conformar las palas (Figura 1).

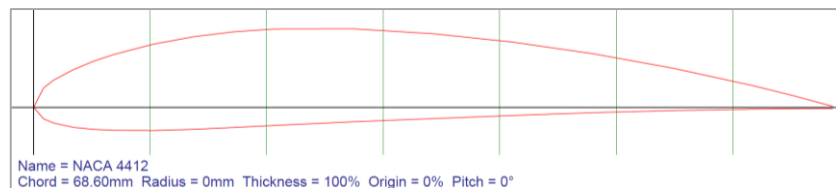


Figura 1. Perfil aerodinámico en el inicio de la pala  
Fuente: Software Airfoil Tool

Para evaluar el comportamiento aerodinámico del rotor ante diferentes direcciones relativas del viento incidente respecto al ángulo de las palas el modelo posee un mecanismo que permite cambiar el ángulo de ataque de las hélices del aerogenerador. Este sistema permite cambiar la posición de la hélice desde un ángulo de ataque de 0° hasta 90°. Esta última posición se denomina de bandera y no permite generar movimiento de rotación del aerogenerador sacándolo de servicio. El mecanismo es accionado por un

servomotor que es comandado por un controlador de Arduino. En la Figura 2 se observa la pala diseñada y el modelo ensamblado.

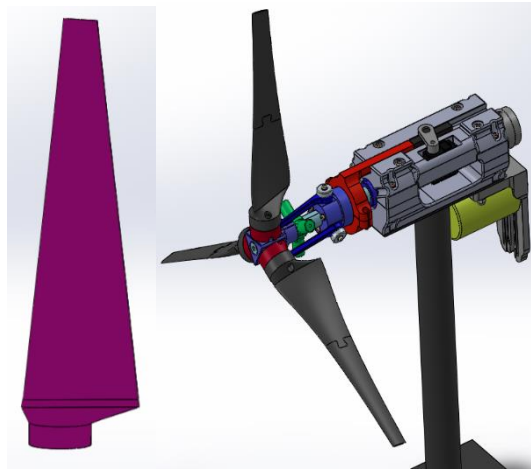


Figura 2. Pala diseñada, modelo ensamblado.  
Fuente: elaboración propia

Para la generación de energía eléctrica se utiliza un motor de corriente continua. La tensión generada es controlada mediante un microcontrolador Arduino, que controla las rpm del aerogenerador, las rpm del eje del aerogenerador y la temperatura del servomotor. En la Figura 3 se observa el esquema de conexión y una foto del sistema midiendo las distintas rpm y la temperatura, también se observa la carga, lámpara de 10W, encendida. Con dos multímetros digitales se toman las lecturas de corriente y tensión respectivamente.

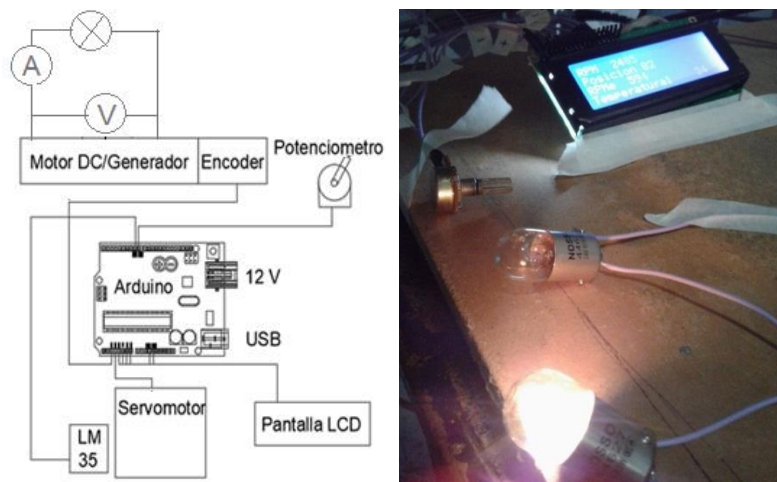


Figura 3. Esquema del circuito y foto ilustrativa del ensayo  
Fuente: elaboración propia

El modelo se ensaya en el túnel de viento Jacek Gorecki de la Facultad de Ingeniería de la UNNE que es un túnel de capa límite de bajas velocidades, cuya cámara de ensayos tiene 2,4 m de ancho por 1,8 m de alto y 22,4 m de longitud. El modelo del aerogenerador se coloca fijamente en la mesa II del túnel, y luego se ubican los cables que conectan a la batería de 12 Volt, la pantalla LCD y al motor DC usado para la generación con la carga. En la Figura 4 se observa el túnel de viento y el modelo del aerogenerador colocado en la mesa de ensayos.



Figura 4. Túnel de Viento Jacek Gorecki y modelo del aerogenerador.  
Fuente: elaboración propia

En primer lugar se realiza el relevamiento, empleando un tubo de Pitot Prandtl, de los perfiles verticales de velocidad a barlovento y a sotavento del modelo, que posteriormente serán empleados para realizar un balance energético y luego la evaluación aerodinámica del aerogenerador.

En la práctica preliminar efectuada con alumnos, los ensayos se realizaron con dos velocidades de viento incidente; 5,26 m/s y 6,76 m/s en las que se evaluaron los parámetros adimensionales TSR y número de Reynolds. Una vez encendido el ventilador del túnel, se ubicaron las aspas del aerogenerador en posición de bandera, luego se variaron los ángulos de ataque. En cada posición, se realizaron mediciones en vacío y con carga, con las lámparas conectadas.

## **5. Resultados del ensayo preliminar y discusión**

En la Tabla 1 se indican los valores medidos en el túnel de viento con velocidad de 5,26 m/s, en vacío y con carga, para los distintos ángulos de ataque de las palas. Los ángulos están referidos a la posición de ataque en la base de los perfiles. En la Tabla 2 se indican los valores obtenidos en el túnel de viento con velocidad de 6,76 m/s, en vacío y con carga. Es posible observar que el valor de la corriente se mantiene estable en casi todas las posiciones. Se observa también que la potencia consumida, al ser prácticamente constante la corriente, sigue la evolución de la tensión. Los valores del parámetro adimensional TSR son adecuados cuando el ángulo de ataque se aproxima a 30°.

Los ensayos preliminares en el túnel de viento permitieron a los alumnos verificar el funcionamiento del dispositivo de control y de generación bajo situaciones controladas y con flujos de características conocidas.

Se destaca el rol activo de los estudiantes durante toda la experiencia, el docente solo supervisó la práctica. Los alumnos pudieron visualizar y medir, parámetros que antes eran

solo teóricos, realizando un aprendizaje a través de la observación y la acción. Además, registraron la experiencia mediante fotografías y videos que emplearon para la presentación de los resultados en forma escrita y oral.

A partir de esta experiencia preliminar los alumnos, pudieron realizar por primera vez una práctica vinculada a la mecánica de los fluidos, visualizando el efecto de la acción dinámica del fluido ante dos situaciones de operación del túnel de viento. Además, la práctica favoreció la interacción con los docentes en instancias posteriores al ensayo, y a través de consultas se afianzaron conocimientos que se plasmaron en un informe escrito. Los resultados obtenidos fueron empleados por un grupo de alumnos para su trabajo final de carrera, en dicha presentación se evidenció coherencia en la fundamentación de los procedimientos basada en los conceptos teóricos de la mecánica de los fluidos y un gran compromiso por parte de los alumnos.

Tabla 1. Valores medidos en vacío y con carga para distintas posiciones de las palas con velocidad de viento de 5,26 m/s.

Ángulo	Vacío			Carga				
	RPM vacío	TSR vacío	Tensión vacío (Volt)	RPM carga	TSR carga	Tensión carga (Volt)	Corriente (Amp)	Potencia (Watt)
70	104	0,609	2,9	87	0,509	1,8	0,04	0,072
51	237	1,384	6,7	190	1,112	4,5	0,07	0,315
45	372	2,177	10,6	157	0,919	3,6	0,07	0,252
35	716	4,191	19	564	3,301	16	0,14	2,24
30	788	4,609	21,6	678	3,966	18	0,16	2,88
28	819	4,791	22,2	696	4,071	18,4	0,16	2,944

Fuente: elaboración propia

Tabla 2. Valores medidos en vacío y con carga para distintas posiciones de las palas con velocidad de viento de 6,76 m/s.

Ángulo	Vacío			Carga				
	RPM vacío	TSR vacío	Tensión vacío (Volt)	RPM carga	TSR carga	Tensión carga (Volt)	Corriente (Amp)	Potencia (Watt)
90	15	0,081	0,2		0		0	
78	32	0,170	0,9	27	0,146	0,6	0,02	0,012
70	150	0,810	4	138	0,745	3,35	0,06	0,201
51	381	2,055	10,55	361	1,947	9,1	0,11	1,001
45	561	3,030	15	523	2,822	13,35	0,14	1,869
35	747	4,035	20,2	707	3,816	17,7	0,16	2,832
30	940	5,077	25	851	4,597	21,2	0,17	3,604
28	1005	5,426	27	916	4,945	23,65	0,2	4,73

Fuente: elaboración propia

La evaluación de los alumnos se realiza durante toda la experiencia, se consideran cómo criterios de evaluación: la pertinencia en la participación, el conocimiento del marco teórico de la práctica, el respeto por el trabajo colaborativo. Se evalúa el proceso de medición y obtención de datos, observando como el grupo se desempeña en las distintas tareas y la capacidad para resolver, tomar decisiones durante el ensayo, el procesamiento y presentación de los resultados, el análisis crítico de la experiencia y la vinculación con los conceptos teóricos requeridos.

Esta tarea la realiza el docente empleando una grilla evaluativa, que completa a partir de la observación del desempeño de los alumnos durante todas las etapas del trabajo incluyendo su posterior presentación escrita y oral.

El aula virtual de la cátedra se emplea en la etapa de presentación de informes escritos y para responder consultas vinculadas al procesamiento de las mediciones realizadas. Esto permite generar retroalimentaciones oportunas a las presentaciones con el objeto de mejorar el resultado final de la entrega.

## **6. Conclusiones y recomendaciones**

Esta propuesta educativa ha sido elaborada con el objeto de aumentar el interés en los alumnos y obtener una mejora general en la calidad de la enseñanza de las prácticas de laboratorios.

Los ensayos preliminares sirvieron de base para probar el funcionamiento del modelo ensamblado, los dispositivos de control de palas, el dispositivo de control y de generación bajo situaciones controladas y con flujos de características conocidas. Con respecto a la semejanza de las características del flujo en la estela, los valores de TSR obtenidos permiten prever un comportamiento adecuado del modelo habilitando la realización de la práctica propuesta.

Los alumnos demostraron interés durante todas las etapas de la práctica preliminar, trabajando de manera ordenada y participativa tanto en la adquisición de datos como en la presentación de los resultados. Respondieron positivamente a las indicaciones dadas por los docentes en las clases de consulta, y fueron capaces de elaborar un informe detallado y teóricamente fundamentado de la práctica realizada.

Con este tipo de prácticas se propone un aprendizaje constructivista, buscando alumnos activos, críticos, capaces de pensar por sí mismos y de comunicar los resultados obtenidos, que sepan desempeñarse de manera efectiva en equipos de trabajo, utilizando de manera eficiente el tiempo y los recursos técnicos disponibles. Este tipo de aprendizaje requiere del seguimiento de los alumnos en todo el proceso, tarea que se realiza de manera presencial o virtual.

El empleo del aula virtual genera un espacio asincrónico de apoyo a las clases presenciales, en el cual se prioriza la comunicación entre los docentes y los alumnos, en las etapas previas y posteriores al laboratorio. Resulta una herramienta muy empleada por los alumnos para realizar las consultas.

Este tipo de prácticas en la enseñanza de mecánica de los fluidos es una herramienta pedagógica que permite al alumno visualizar los procesos que se desarrollan en distintos casos de análisis y favorece el desarrollo de procesos de comprensión, generando aprendizajes duraderos y recuperando su entusiasmo por aprender. Por lo cual se seguirán planteando casos de análisis empleando esta modalidad y otras actividades que



promuevan e incentiven a los alumnos a trabajar en equipo, favoreciendo así a la construcción de aprendizajes significativos.

## **7. Referencias**

- [1] MASTACHE, ANAHÍ (2007). *Formar personas competentes, Desarrollo de competencias tecnológicas y psicosociales*. Ediciones Novedades Educativas. Buenos Aires. Primera edición.
- [2] CONFEDI (2018). *Propuesta de estándares de segunda generación para la acreditación de carreras de ingeniería en la República Argentina “Libro Rojo de CONFEDI”* - Aprobado por la Asamblea del Consejo Federal de Decanos de Ingeniería de la República Argentina Rosario - 1 de junio de 2018.
- [3] DÍAZ BARRIGA, F. (2003). *Cognición situada y estrategias para el aprendizaje significativo*. Revista Electrónica de Investigación Educativa, 5 (2). Consultado el 20 de junio de 2018 en: <http://redie.ens.uabc.mx/vol5no2/contenido-arceo.html>.
- [4] POZO, I. (2006). *Teorías Cognitivas Del Aprendizaje*. Editorial Morata España
- [5] CONFEDI (2014). *Competencias en ingeniería*. 1ª ed.- Mar del Plata: Universidad FASTA.
- [6] ALVAREZ Y ALVAREZ, GISELA M.; ADOTTI, MARCELO I., DE BÓRTOLI, MARIO E. (2017) *Experiencias en el uso de tecnologías como apoyo en la enseñanza universitaria*. 1º Congreso de Educación y tecnologías del Mercosur. Corrientes.
- [7] DEBNATH B.C., RAHMAN M.M. AND HOSSAIN M. J. (2014) *Blended Learning Approach for Engineering Education –An Improvement Phase of Traditional Learning* IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security, VOL.14 No.11, November 2014.