

Estimaciones acerca de la producción de energía eléctrica mediante aerogeneradores. Una experiencia docente en grados de ingeniería

L. R. Rodríguez¹, R. Valdés¹, V. Tricio² y J. H. Lucio¹

¹ Dpto. de Física. Universidad de Burgos. EPS. Calle Villadiego s/n. 09001 Burgos.

² Dpto. de Física. Universidad de Burgos. Facultad de Ciencias. Plaza Misael Bañuelos s/n. 09001 Burgos.

E-mail: rvaldes@ubu.es

Resumen

Una de las formas ampliamente difundidas de emplear las energías renovables es la producción de energía eléctrica mediante aerogeneradores. Entre los problemas actuales del desarrollo de la generación eólica se encuentra optimizar el funcionamiento de las instalaciones. Un componente básico de la resolución de dicho problema es la estimación de los valores de los parámetros característicos de la producción de electricidad. En correspondencia con ello, y atendiendo a la distribución estadística de los valores de la velocidad del viento, se enseña a estimar la producción de energía eléctrica, la potencia media, el factor de carga y la probabilidad de generación de energía, que caracterizan el funcionamiento de diversos aerogeneradores a lo largo de una año y durante la estación menos favorable en una localidad determinada. Por otra parte, el trabajo describe brevemente la metodología utilizada en el proceso de enseñanza-aprendizaje. A través del planteamiento y de la resolución de un sistema de tareas de aprendizaje el profesor orienta la labor de los alumnos encaminada a comprender los fundamentos del diseño de sistemas para la producción de electricidad con aerogeneradores.

Palabras clave: generadores eólicos, energías renovables, desarrollo sostenible, enseñanza de las ciencias.

I. INTRODUCCIÓN

La asignatura Energías Renovables se imparte por el Dpto. de Física de la Universidad de Burgos desde el año 2001 y es de libre elección para los alumnos de ciencias básicas e ingenierías a partir del tercer año de formación universitaria. La experiencia que a continuación exponemos ha sido realizada en titulaciones de ingeniería, aunque también es de interés para carreras científicas.

Considerando ideas básicas de la didáctica de las ciencias, la asignatura Energías Renovables presta especial atención al carácter activo de la enseñanza-aprendizaje, a su orientación investigadora, al planteamiento de problemas y a la unidad entre el estudio de la teoría, la resolución de problemas de cálculo y los trabajos de laboratorio. Entre las

características relevantes de la materia, que la hacen particularmente atractiva, se encuentra su estrecho vínculo con las necesidades productivas y el desarrollo humano sostenible.

El objetivo esencial de la asignatura es la introducción al desarrollo sostenible, siendo uno de los contenidos tratados el cambio climático, íntimamente ligado a las emisiones de gases de efecto invernadero. Los alumnos analizan estadísticas sobre el aumento de la concentración de CO_2 atmosférico y su relación con el incremento de la temperatura media del planeta [1] así como estimaciones acerca del agotamiento de los combustibles no renovables. Con estos análisis se puede comprender más claramente la apremiante necesidad de ahorrar materias primas y de sustituir el quemado de combustibles fósiles y nucleares por el uso de energías renovables, para mitigar los efectos del ya inevitable cambio climático.

Una de las formas ampliamente difundidas de emplear las energías renovables es la obtención de energía eléctrica mediante aerogeneradores. La capacidad productiva de este tipo de máquinas aún no se aprovecha plenamente. La ilustración más clara de esta situación es, entre otras posibles, el desperdicio del potencial de generación cuando la demanda de electricidad es relativamente baja. Ello se pone de manifiesto especialmente durante las noches, cuando la población duerme y la velocidad del viento es elevada. Así pues, el estado y las perspectivas de evolución del medio ambiente, las necesidades tecnológicas de la producción y la demanda social del desarrollo sostenible crean el contexto propicio para plantear a los alumnos el siguiente problema general:

Optimizar la producción de energía eléctrica con aerogeneradores.

Un aspecto de la resolución del problema anterior es la estimación inicial de los posibles valores de parámetros característicos de la generación de electricidad durante un año y en la estación menos favorable, con la finalidad de dimensionar una instalación. De acuerdo con ello, el profesor plantea a los alumnos el siguiente problema y objetivos específicos de trabajo:

Estimar la posible producción de energía eléctrica G_T , la potencia media P_T , el factor de carga F_C y la probabilidad W_T de generación de electricidad, que caracterizan el funcionamiento de un aerogenerador a lo largo de un año y durante la estación menos favorable en una localidad determinada.

Para abordar el problema y el objetivo enunciados los alumnos tienen como premisa, además de haber aprobado las asignaturas de Física General, la previa realización de las siguientes actividades durante el curso de Energías Renovables:

- Estudio de los componentes fundamentales de un sistema eólico-fotovoltaico autónomo para la generación de electricidad. Ello incluye analizar el principio de funcionamiento y estructura de los generadores eólicos y de los fotovoltaicos, de los sistemas de acumulación de energía (baterías de plomo-ácido, de litio y de flujo), los acondicionadores de potencia (que integran cargadores de baterías, rectificadores e inversores) y los generadores auxiliares (grupos electrógenos y pilas de combustible).

- Estudio de la distribución probabilística de la velocidad del viento. La más adecuada a los datos estadísticos es la de Weibull, cuya densidad de probabilidad es:

$$f(v) = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right] \quad (1)$$

donde k y c son los denominados parámetros de forma y escala respectivamente.

- Trabajo de laboratorio referido a la caracterización de un aerogenerador en miniatura. En particular, se analizan la dependencia funcional de la potencia de generación eléctrica respecto de la velocidad del aire y el concepto de factor de carga

$$FC = \frac{P_T}{P_N} \quad (2)$$

donde P_N es la potencia nominal del aerogenerador y P_T es la potencia eléctrica media estimada para un período de duración T (anual o estacional).

A través del planteamiento y de la resolución de un sistema de tareas de aprendizaje el profesor orienta la labor de los alumnos encaminada a lograr el objetivo propuesto.

II. SECUENCIA DE TAREAS DE ARPENDIZAJE

Tarea 1. Estudiar las características de los aerogeneradores Gamesa G80 y Garbí 200. Construir en una hoja de cálculo las tablas que expresan la dependencia de la potencia de generación eléctrica respecto de los valores de velocidad del viento para cada una de las turbinas consideradas.

Al solucionar la tarea anterior, los alumnos utilizan los datos aportados por los fabricantes [2, 3] que incluyen, entre otros, la velocidad de arranque v_{arr} , la velocidad v_{par} de parada automática y la potencia nominal P_N de los aerogeneradores, que se obtiene a partir del valor v_N de velocidad (nominal) del viento. Las Figuras 1 y 2 muestran la dependencia de la potencia de los aerogeneradores G80 (2 MW) y Garbí (200 kW) respecto de la velocidad del viento respectivamente. A partir de esas gráficas los estudiantes construyen las tablas de valores correspondientes. Las Tablas I y II representan la variación de la potencia eléctrica de las turbinas eólicas en relación con la velocidad del viento.

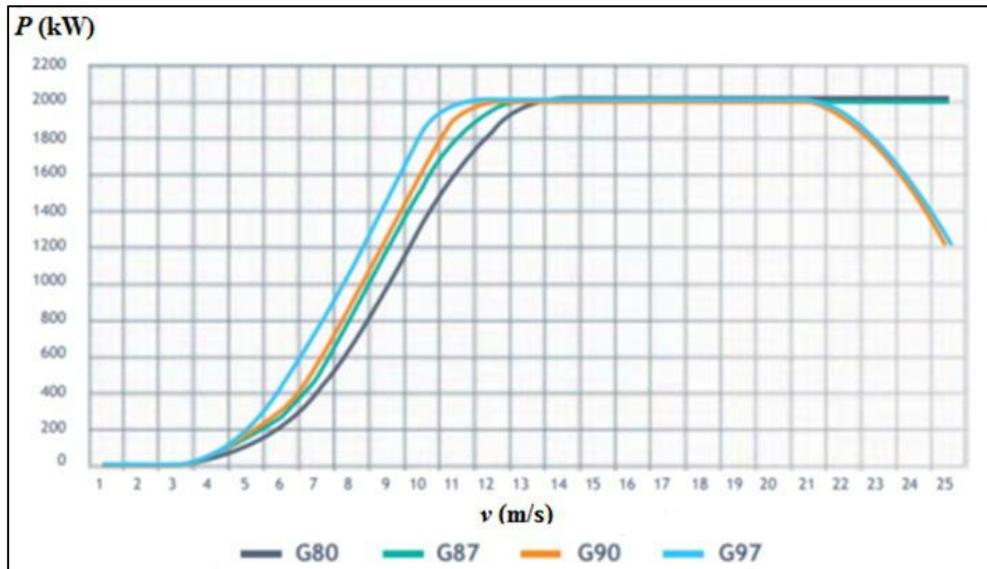


FIGURA 1. Dependencia de la potencia eléctrica respecto de la velocidad del viento para diferentes generadores Gamesa.

TABLA I
Dependencia de la potencia eléctrica
respecto de la velocidad del viento.
Generador G80

v (m/s)	P (kW)	v (m/s)	P (kW)
3.0	0.0	9.5	1080
3.5	20	10.0	1220
4.0	40	10.5	1370
4.5	60	11.0	1500
5.0	90	11.5	1600
5.5	140	12.0	1700
6.0	190	12.5	1780
6.5	270	13.0	1850
7.0	360	13.5	1920
7.5	470	14.0	1970
8.0	600	14.5	2000
8.5	750	20.0	2000
9.0	910	25.0	2000

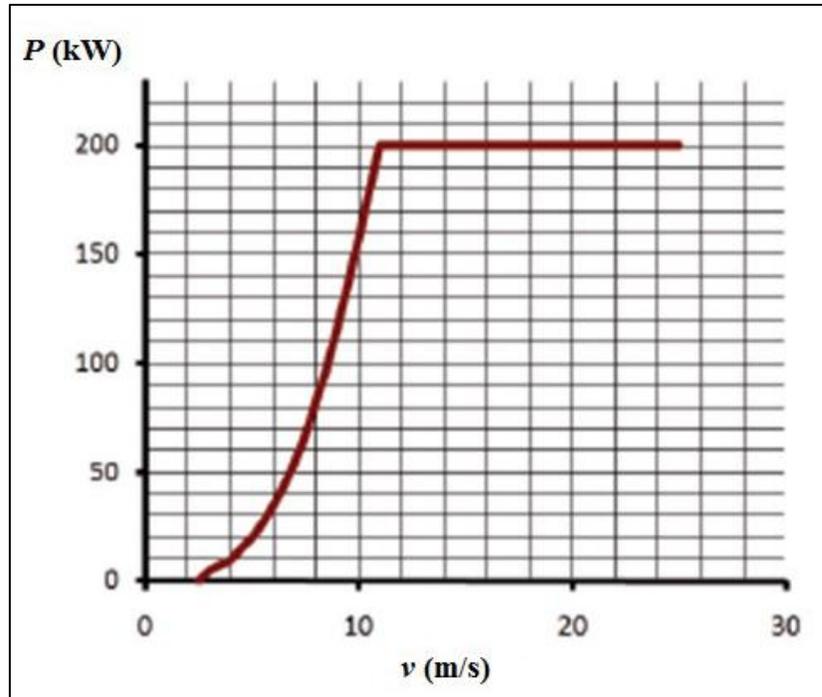


FIGURA 2. Dependencia de la potencia eléctrica respecto de la velocidad del viento para el generador Garbí 200.

TABLA II
Dependencia de la potencia eléctrica
respecto de la velocidad del viento.
Generador Garbí 200

v (m/s)	P (kW)	v (m/s)	P (kW)
2.5	0.0	7.5	68.0
3.0	5.0	8.0	82.0
3.5	7.5	8.5	97.5
4.0	10.0	9.0	116
4.5	15.0	9.5	136
5.0	20.0	10.0	157
5.5	27.0	10.5	179
6.0	35.0	11.0	200
6.5	44.0	20.0	200
7.0	55.0	25.0	200

Tarea 2. Determinar la información de utilidad que el Atlas Eólico de España (AEE) aporta para solucionar la problemática planteada.

Esta actividad posibilita que los alumnos aprendan a emplear la aplicación del AEE [4]. Dadas las coordenadas geográficas o nombre de una localidad, este programa informático permite: obtener la rosa de los vientos, estimar el valor medio de la velocidad del viento y de los coeficientes de la densidad de probabilidad (de Weibull) a diferentes alturas de la torre del aerogenerador en el lugar indicado. Los datos pueden ser referidos a comportamientos anuales o estacionales según se decida. Si la dependencia de la potencia de un aerogenerador respecto de la velocidad del viento viene suministrada en forma de tabla, un programa de cálculo posibilita estimar la energía eléctrica G_T que se puede producir a lo largo del año en la localidad elegida cuando el buje de la máquina se encuentra a 30m, 60m, 80m y 100m de altura.

No obstante, la utilidad de las estimaciones de la producción anual de energía que se realizan con el AEE, la formación de los ingenieros se puede complementar con el estudio de los fundamentos físicos y matemáticos del diseño de instalaciones y la elaboración de programas informáticos pertinentes.

No solamente España, también otros países tienen o construyen sus mapas o atlas eólicos. Ello aporta generalidad al sistema de tareas que utilizamos.

Tarea 3. Emplear el AEE con el fin de elegir una localidad donde el valor medio de la velocidad del viento sea apropiado para la producción de electricidad con los aerogeneradores indicados. Determinar el parámetro de forma k y el de escala c de la distribución de Weibull de valores de velocidad del viento a las alturas de colocación de los bujes de los aerogeneradores en la localidad elegida.

El AEE permite definir los valores de la velocidad media del viento a distintas alturas del buje del aerogenerador en diferentes zonas del país. La experiencia indica que cuando la velocidad media del viento supera los 5 m/s, existen condiciones favorables para aprovechar la potencia eólica. Durante las clases los alumnos seleccionan el posible lugar de instalación de las máquinas eólicas atendiendo a sus zonas de residencia. A continuación, presentamos un ejemplo concreto de los datos obtenidos con el AEE para una de las localidades estudiadas. La Tabla III contiene la información correspondiente al período $T = 1$ año, relativa al municipio de Cogollos en la provincia de Burgos. La Tabla IV muestra los coeficientes estacionales de la distribución de Weibull a 80 m de altura sobre tierra y los valores de la velocidad media característicos de esa localidad. De los valores de velocidad se infiere que el verano es la peor estación del año para la generación eólica de electricidad, como cabía esperar.

TABLA III
Datos anuales de velocidad del viento. Cogollos, Burgos

Coordenadas geográficas: latitud 42.2 N, longitud -3.70 E				
Coordenadas UTM: 442 145, 4 672 767				
Altura sobre el nivel del mar: 904 m				
$T = 8760$ h				
Altura de bujes (m)	30	60	80	100
Velocidad media (m/s)	5.39	6.09	6.41	6.66
Weibull c (m/s)	6.19	6.92	7.23	7.47
Weibull k	2.17	2.162	2.132	2.1

Tabla IV
Datos estacionales de velocidad del viento. Cogollos, Burgos

Coordenadas geográficas: latitud 42.2 N, longitud -3.70 E				
Coordenadas UTM: 442 145, 4 672 767				
Altura sobre el nivel del mar: 904 m				
Altura del buje del aerogenerador: 80 m				
	Primavera	Verano	Otoño	Invierno
Velocidad media (m/s)	6.27	5.78	6.59	6.99
Weibull c (m/s)	7.03	6.31	7.34	7.93
Weibull k	2.237	2.371	1.985	2.189

Tarea 4. Construir el gráfico de la función densidad de probabilidad de velocidades del viento que caracteriza el lugar de instalación de los aerogeneradores. Presentar los resultados en una hoja de cálculo. Considerar que el buje del generador G80 se instala a 80 m de altura y que el Garbí 200 a 30m.

Las Figura 2 muestra el gráfico de la distribución anual de velocidades, obtenido para 80 m de altura. Una representación análoga se obtiene cuando la torre de la máquina eólica tiene 30 m.

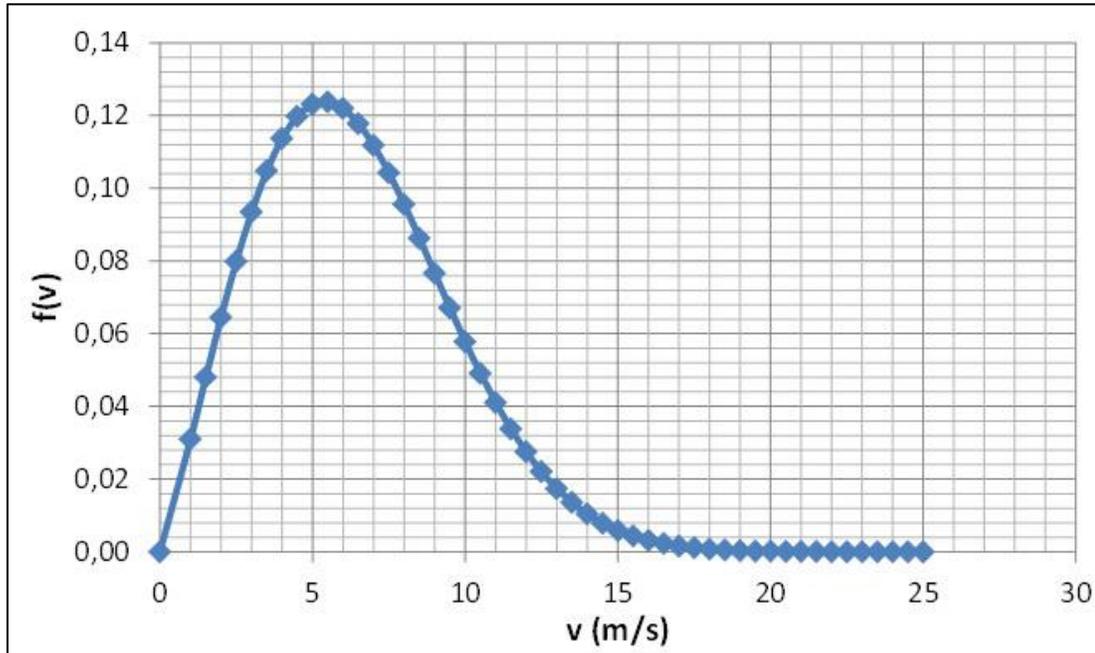


FIGURA 3. Densidad de probabilidad de Weibull correspondiente a la altura de 80 m.

Tarea 5. Determinar las fórmulas necesarias para estimar la probabilidad W_T de generación de electricidad, la potencia eléctrica media P_T y la energía G_T que se puede producir en el período T de funcionamiento del sistema eólico.

La expresión (1) permite hallar la probabilidad de generación de electricidad, la producción de energía y la potencia media, características de determinado intervalo de tiempo T de funcionamiento de la máquina eólica en el lugar de instalación. Se pueden utilizar diferentes procedimientos para realizar las deducciones, todos los cuales finalmente conducen al empleo de algún método numérico de integración.

La probabilidad W_T de generación eléctrica en el período T se halla a través de la expresión

$$W_T = \int_{v_{arr}}^{v_{par}} f(v)dv \tag{3}$$

donde $f(v)$ es la densidad de probabilidad (1), v_{arr} es la velocidad del viento a partir de la cual comienza la producción de electricidad y v_{par} es el límite superior de la velocidad del viento que determina el frenado del aerogenerador por razones de seguridad.

La potencia media de generación en el intervalo de tiempo T es

$$P_T = \int_{v_{arr}}^{v_{par}} P(v)f(v)dv \quad (4)$$

Las expresiones para realizar el cálculo numérico de la probabilidad y potencia media indicadas, conforme al método de los trapecios, son

$$W_T = \left[\frac{f(v_{arr}) + f(v_{par})}{2} + \sum_{i=1}^{n-1} f(v_i) \right] \Delta v \quad (5)$$

$$P_T = \left[\frac{P(v_{par})f(v_{par})}{2} + \sum_{i=1}^{n-1} P(v_i)f(v_i) \right] \Delta v \quad (6)$$

donde $(v_{i+1} - v_i) = \Delta v$ es un paso constante de integración numérica, n es el número de pasos de integración, $v_0 = v_{arr}$, $v_n = v_{par}$ y $P(v_{arr}) = 0$.

Finalmente, la energía eléctrica producida se estima mediante la relación

$$G_T = TP_T \quad (7)$$

Tarea 6. Construir el algoritmo general necesario para estimar la probabilidad W_T de generación de electricidad, la producción de energía G_T , la potencia media P_T y el factor de carga F_C de los aerogeneradores G80 y Garbí 200. Desarrollar dicho algoritmo en una hoja de cálculo.

El algoritmo que a continuación se presenta es resultado de la puesta en común de las ideas de los estudiantes orientados por el profesor:

1. Definir las magnitudes siguientes: v_{arr} , v_{par} , n , T , k y c .
2. Hallar $\Delta v = \frac{v_{par}-v_{arr}}{n}$
3. Definir las funciones $f(v)$ y $P(v)$. Estas funciones pueden ser expresadas analíticamente o en forma de tabla. En nuestro caso, los estudiantes trabajan representando $f(v)$ y $P(v)$ mediante tablas, dado que hacen los cálculos en una hoja Excel.
4. Estimar la probabilidad W_T utilizando la expresión (5)

$$W_T = \left[\frac{f(v_{arr}) + f(v_{par})}{2} + \sum_{i=1}^{n-1} f(v_i) \right] \Delta v$$

5. Estimar P_T utilizando la fórmula (4)

$$P_T = \left[\frac{P(v_{par})f(v_{par})}{2} + \sum_{i=1}^{n-1} P(v_i)f(v_i) \right] \Delta v$$

6. Hallar con la relación (7) la energía producida en el intervalo de tiempo T

$$G_T = TP_T$$

7. Determinar el factor de carga conforme a la fórmula (2)

$$F_C = \frac{P_T}{P_N}$$

Tarea 7. Presentar en tablas los resultados obtenidos al ejecutar el algoritmo construido. Comparar dichos resultados con los valores que aporta la herramienta de cálculo disponible en el AEE.

La Tabla V contiene los resultados de las estimaciones realizadas por un alumno.

TABLA V				
Resultados de las estimaciones realizadas				
Generador: G80				
Altura del buje: 80 m				
T	W_T	P_T (kW)	G_T (MWh)	F_C
1 año = 8760 h	0.83	463	4056	0.23
Verano, 2190h	0.81	300	657	0.15
Generador: Garbí 200				
Altura del buje: 30 m				
T	W_T	P_T (kW)	G_T (MWh)	F_C
1 año = 8760 h	0.84	43.1	377	0.22

Durante sus cálculos los estudiantes comprueban que la herramienta ofrecida por el AEE aporta los valores estacionales de los coeficientes de la distribución de Weibull solamente para velocidades del viento medidas a la altura de 80 m. Sin embargo, tiene interés práctico caracterizar completamente la generación eléctrica de la turbina Garbí a 25 y 40 m de altura y de las turbinas Gamesa por encima de los 80 m. Así pues, se plantea un nuevo problema:

Idear un procedimiento que, dados los coeficientes c y k de la función de distribución de Weibull para una altura determinada (en nuestro caso 80 m), permita estimar los correspondientes a otra altura cualquiera. Esta problemática puede ser solucionada utilizando en la determinación de la distribución probabilística apropiada las fórmulas que relacionan la velocidad del viento con la altura [5].

Al comparar los resultados obtenidos respecto al generador G80 con los que resultan de usar la herramienta de cálculo del AEE, los alumnos comprueban la bondad de sus estimaciones. En efecto, la herramienta de cálculo del AEE aporta el valor anual $G_T = 4083$ MWh, cuya diferencia relativa en relación con el valor indicado en la Tabla V construida por los alumnos es 0,6%. La razón de la discrepancia queda clara si se tiene en cuenta que el paso de integración utilizado en el AEE es el doble del empleado por los estudiantes y, por tanto, el valor obtenido por ellos tiene menos influencia del error del método numérico empleado.

Tarea 8. Precisar las limitaciones del estudio realizado y plantear nuevos aspectos de interés para continuar trabajando en la resolución del problema planteado.

Entre los aspectos de interés que pueden ser considerados para ampliar y profundizar los conocimientos en torno al problema general de optimización enunciado se encuentran los siguientes:

- Idear un procedimiento que posibilite, dados los coeficientes c y k de la función de distribución de Weibull hallados para una altura determinada (en nuestro caso 80 m), estimar los correspondientes a otra altura cualquiera.
- Incluir en las estimaciones de energía G_T producida, las pérdidas debidas al paso de la electricidad por los sistemas de transmisión desde el generador hasta el consumidor.
- Analizar cómo explotar más completamente el potencial eólico de producción de electricidad durante las horas de bajo consumo de la población. Por ejemplo, almacenar el superávit de energía en las baterías o utilizarlo para producir hidrógeno electrolítico aprovechado en el transporte automotor. Explorar la utilización de redes inteligentes para la producción de electricidad.
- Profundizar en el estudio de los medios para el almacenamiento de la energía y prestar especial atención a desarrollos tecnológicos prometedores como las baterías de flujo y las pilas de combustible.
- Estimar la probabilidad de pérdida de potencia de un sistema eólico de producción de electricidad. Relacionar esta magnitud con instalaciones eólicas y eólico-fotovoltaicas aisladas.
- Analizar vías para determinar la configuración de mínimo coste de sistemas eólicos y eólico-fotovoltaicos aislados de producción de electricidad.

Los aspectos anteriormente indicados y otros son objeto de análisis colectivo. Así, los estudiantes se implican en líneas actuales de la investigación y de los desarrollos tecnológicos en el campo de las energías renovables.

Tarea 9. Presentar una memoria del estudio realizado.

Como paso previo a la elaboración de la memoria escrita se solicita a los alumnos construir un plan detallado para redactarla. Ese plan debe contener los posibles títulos de las partes del trabajo, sus epígrafes y subtítulos. Es deseable la presentación oral de las memorias.

III. CONCLUSIONES

Durante nuestra actividad docente hemos utilizado ideas básicas de la didáctica de las ciencias y comprobado la utilidad de las mismas. Con trabajos de curso como el descrito logramos familiarizar a los alumnos con problemas actuales de la investigación en el campo de las energías renovables y del desarrollo humano sostenible, estableciendo además perspectivas para continuar avanzando en el estudio de las temáticas analizadas.

Los sistemas de tareas docentes son un procedimiento eficaz para orientar el aprendizaje de los alumnos y, junto a la elaboración de algoritmos de cálculos y planes para redactar memorias sobre la labor realizada, favorecen la adquisición de habilidades para estructurar mejor el pensamiento.

IV. REFERENCIAS

- [1] Valdés, P. y Valdés, R. Estudio del aumento de la concentración del CO₂ atmosférico en un curso universitario inicial de ciencias. *Revista Iberoamericana de Educación*, 65/ 2(2014) 1-16.
- [2] Gamesa. Catálogo de aerogeneradores.
<http://www.gamesacorp.com/es/productos-servicios/aerogeneradores/catalogo/> [Consulta: febrero de 2016].
- [3] ElectraWind. Ficha técnica de aerogeneradores de media potencia.
<http://www.electriawind.com/productos.html> [Consulta: febrero de 2016].
- [4] IDAE. Atlas Eólico de España. <http://atlaseolico.idae.es/> [Consulta: octubre de 2016].
- [5] Rodríguez, J. L., Burgos, J. C. y Arnalte, S. Sistemas eólicos de producción de energía eléctrica (Editorial Rueda, S.L., Madrid 2003), pp. 35-40.