

AEROGENERADORES

LA ENERGÍA A PARTIR DEL VIENTO

© Asociación danesa de la industria eólica

Mira el Sol. Hace unos 4,5 millones de años que una nueve de átomos en el espacio empezó a contraerse, el aumento de temperatura hizo que los núcleos de los átomos se fusionasen para crear núcleos más pesados – y energía. El resultado fue el Sol.

La Tierra y otros planetas se formaron a partir de materia que se movía tan rápidamente que pudo evitar ser atraída por la gran cantidad de materia que estaba siendo acumulada en el Sol. Ahora, billones de años después, podemos mirar hacia el Sol, que se halla a 150 millones de km, y recibir sus rayos de luz.

EJERCICIO 1. La distancia media de la Tierra al Sol es de $1,4960 \cdot 10^{11}$ m. La velocidad de la luz es $2,9979 \cdot 10^8$ m/s. Calcula el tiempo en segundos que le cuesta a la luz del Sol alcanzar la Tierra.

LA ENERGÍA NO PUEDE DES-APARECER – LA ENERGÍA PUEDE CONVERTIRSE

Los rayos del Sol son la fuente de todo tipo de vida normal en la Tierra. Los rayos contienen la energía para las plantas verdes, tanto en terrestres como marinas, que son la base de las cadenas alimenticias.

Un principio fundamental es que la energía no puede crearse ni desaparecer. Es el denominado Principio de Conservación de la Energía. La energía puede convertirse de una forma a otra. La mayor parte de la energía de los rayos de Sol que atraviesan la atmósfera terrestre se convierte en calor.

Un resultado menos obvio es que parte de la energía de los rayos

solares se convierte en energía eólica. Los rayos solares crean diferentes temperaturas en diferentes localizaciones alrededor del mundo. Donde está caliente el aire se expande, y donde está frío se contrae. El aire expandido crea una baja presión barométrica, y el aire contraído crea una alta presión barométrica. Las diferencias de presión se compensan cuando el aire se mueve – cuando sopla el viento. Alrededor de un 1-2% de energía del sol es convertida en energía eólica.

La energía se mide en julios, J abreviado. Algunos rayos de Sol crean, p.ej. 100 J, que después son convertidos. Si 1 J se convierte en energía eólica, según el Principio de Conservación de la Energía los 99 J restantes deben convertirse en otro tipo de energía. Esta otra forma de energía es principalmente energía calorífica.

A la energía calorífica se le denomina normalmente calor. Pero los físicos consideran que el calor es energía calorífica que se mueve de un sitio a otro.

El viento son moléculas de aire en movimiento. A la energía por el movimiento también se le denomina energía cinética. Así pues, la energía eólica es la energía cinética de las moléculas de aire.

EJERCICIO 2. La energía nuclear (la energía que proviene de la fusión de núcleos de átomos), la energía de los rayos solares, la energía eólica y la energía cinética se han explicado más arriba.

Propón ejemplos de otras formas de energía. ¿Cómo utilizamos las diferentes formas de energía en nues-

tra vida diaria?

Cotidianamente decimos que utilizamos energía, cuando en realidad ésta se convierte de una forma a otra.

EJERCICIO 3. Encuentra ejemplos de energía convertida. Utiliza, p.ej., alguno de los resultados de los ejercicios anteriores.

DE ENERGÍA EÓLICA A ENERGÍA ELÉCTRICA

Un aerogenerador convierte energía eólica en energía eléctrica. Lee sobre torres, rotores, góndolas, multiplicadores y generadores en Internet <http://www.windpower.org> en la sección de la Visita Guiada o en Moliner y el viento.

EJERCICIO 4. Escribe media página sobre cada uno de estos componentes de aerogeneradores. ¿P.ej.Cuál es el tamaño máximo de una torre?

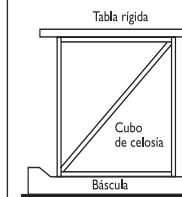
EJERCICIO 5. Haz un dibujo de un aerogenerador conectado a la red eléctrica y explica el proceso de conversión de la energía eólica en energía eléctrica, señalando en el dibujo las diferentes formas de energía. La energía rotacional es una forma de energía. ¿Con qué partes del aerogenerador está relacionada este tipo de energía?

EJERCICIO 6. Encuentra la dinamo de una bicicleta vieja. Pídele a tu profesor que te la desmonte y comenta las diferentes partes y sus funciones. La dinamo de una bici es de hecho un generador.

LA FUERZA DE LA TORRE

La torre debe ser lo suficientemente fuerte como para soportar la góndola y el rotor, y al mismo tiempo soportar intensas cargas de viento – por una parte, la fuerza que el viento ejerce contra la torre directamente, y por otra, la fuerza transferida desde el rotor.

Podemos aprender mucho sobre las cargas en la torre de un aerogenerador real experimentando con componentes de una torre hecha de papel. A menudo, en la industria eólica se utilizan ensayos destructivos de material en los que la fuerza aplicada a los componentes se aumenta hasta que se rompen, con el fin de encontrar la fuerza real de cada componente.



1) Construye un cubo de celosía tal como se explica en las instrucciones de montaje. Sitúa el cubo sobre

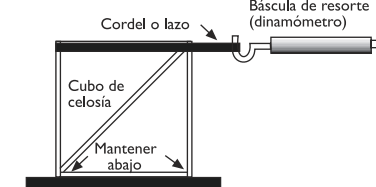
una balanza y pon una tabla rígida encima. Coloca las manos en la tabla e incrementa la presión suavemente. Mira el peso que marca la balanza y fíjate en qué momento empieza a romperse el cubo.

Nuestro cubo de celosía se empezó a romper a los : _____kg

Comparando con las cargas en una torre real, ¿qué tipo de carga es la que se ha ensayado?

2) Construye otro cubo de celosía o repara el del experimento anterior. Colócalo sobre una superficie dura. Dos personas presionan firmemente las esquinas inferiores contra la superficie. Una tercera persona coloca

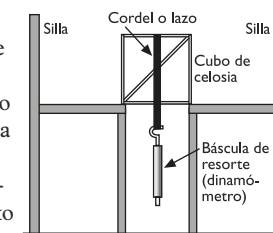
una cuerda con un nudo apretado alrededor de las esquinas superiores. Se usa una báscula de resorte (o un dinamómetro) para estirar suave y horizontalmente del nudo.



Nuestro cubo de celosía se empezó a romper a los: _____kg

¿Puede compararse a la carga en una torre de aerogenerador real?

3) Construye de nuevo otro cubo de celosía o repara el del experimento anterior.



Dos de las caras del cubo de celosía se sitúan p.ej. en dos sillas y anudamos un cordel alrededor del cubo. Utilizamos una báscula de resorte (o un dinamómetro) para estirar suavemente del cordel.

Nuestro cubo de celosía se empezó a romper a los: _____kg

¿Puedes compararse con la carga sobre una torre de aerogenerador real?

¿Cuáles son los puntos más resistentes y los más débiles de la torre de celosía? ¿Por qué las construcciones de celosía son tan resistentes siendo débiles sus componentes? Halla la explicación en <http://www.windpower.org/es/tour/wtrb/tower.htm>

ROTORES

Los rotores de los aerogeneradores han incrementado su tamaño a lo largo de los años. La razón es que cuánto más grande es la superficie barrida por el rotor, más energía de las moléculas de aire se puede capturar – hay más moléculas que pueden entregar energía a la turbina. La energía que es capaz de generar un aerogenerador es proporcional a la superficie barrida por el rotor. Un rotor cubre un disco circular durante cada rotación y de esta forma captura la energía de las moléculas de aire que hay en ese disco circular. El área A de un disco circular es igual a la siguiente fórmula:

$$A = \pi \cdot r^2 = \pi \cdot (\frac{1}{2}d)^2$$

Donde r es el radio del disco circular, d es el diámetro y π es pi, $\pi = 3.1415..$

Como ejemplo coge un aerogenerador con un diámetro de rotor de 90 m y halla el área barrida por el rotor.

$$A = \pi \cdot (\frac{1}{2}d)^2 = \pi \cdot (\frac{1}{2} \cdot 90\text{m})^2 = 6362\text{m}^2$$

Esta área es prácticamente igual al tamaño de un campo de fútbol.

EJERCICIO 7. Halla el área barrida por el rotor para unos diámetros de rotor de 30 y 60 m. Un diámetro de 60 m es el doble del de 30 m. ¿Cuántas veces mayor es el área? Respecto al área de un campo de fútbol estándar, de 65 m de ancho y 102 de largo, ¿qué porcentaje representa?

AEROGENERADORES DE VELOCIDAD DE GIRO LENTA Y VELOCIDAD DE GIRO RÁPIDA

Un factor importante para un aerogenerador es la relación entre la velocidad en punta de pala y la velocidad del viento. Un aerogenerador gira



EFFECTO PARQUE

Este experimento debe llevarse a cabo en el exterior, con un viento moderado (¡y sin lluvia!)

Los parques eólicos se instalan tanto en el mar como en tierra. Cuando los aerogeneradores explotan la energía eólica están frenando el viento. La experiencia indica que los aerogeneradores deben situarse a una distancia entre ellos de 5 a 9 diámetros de rotor en la dirección del viento predominante, y de 3 a 5 diámetros de rotor en la dirección perpendicular a la del viento predominante. Sitúa un aerogenerador enfrente de un ventilador. Coloca otro aerogenerador en diferentes sitios detrás del primer aerogenerador. ¿Las palas giran más lentamente si los acercamos?

EJERCICIO. ¿Qué pros y contras puede haber en la instalación de un parque eólico respecto a la instalación de una única turbina?

Puedes leer más sobre cómo situar los aerogeneradores en <http://www.windpower.org>.

lentamente si la velocidad en la punta de las palas es aproximadamente la misma que la velocidad del viento. Una rosa de los vientos, conocida por las películas del oeste, gira lentamente. Si la velocidad en punta de pala es varias veces mayor que la velocidad del viento el aerogenerador gira rápidamente. Los clásicos molinos de viento holandeses o los molinos de viento mediterráneos tipo vela tienen una velocidad en punta de pala de 4 veces la velocidad del viento. Los aerogeneradores modernos también giran rápidamente, con una velocidad en punta de pala de 8 a 10 veces la velocidad del viento.

El ingeniero británico John Smea-

ton (1724-1792) descubrió varias reglas básicas aplicables a aerogeneradores con una carga constante. La primera regla de Smeaton es que la velocidad en punta de pala es (casi) proporcional a la velocidad del viento. En otras palabras, la velocidad en punta de pala es (casi) una constante multiplicada por la velocidad del viento, considerando que el aerogenerador soporta una carga constante. La mayoría de aerogeneradores modernos que producen corriente alterna giran con una velocidad en punta de pala prácticamente constante. Esto se debe a que el aerogenerador se bloquea a la frecuencia de la red.

Los aerogeneradores no pueden girar a una velocidad infinitamente alta debido a la fricción de los rodamientos y porque las palas entrarían en pérdida “stall”.

Lee más sobre la pérdida de sustentación en <http://www.windpower.org/es/tour/wtrb/stall.htm>

Si conoces el diámetro del rotor d y, por lo tanto, conoces también el radio del rotor $r = \frac{1}{2}d$ así como el tiempo T para una rotación, entonces puedes calcular la velocidad en punta de pala como

$$v_t = \frac{2 \cdot \pi \cdot r}{T}$$

La velocidad se define como la distancia partida por el tiempo, por lo que la fórmula muestra que la punta de la pala recorre una circunferencia $2\pi \cdot r$ en un periodo de rotación T .

EJERCICIO 8. Calcula la distancia que recorre la punta de una pala de un aerogenerador con un diámetro de rotor de 90 m.

Compáralo con una noria. Puedes haber observado que la velocidad aumenta cuanto más lejos estás del centro. Pasa lo mismo con un aerogenerador. A un número constante de revoluciones por minuto (conocido como velocidad de giro en la termi-

nología de aerogeneradores) la velocidad en punta de pala aumentará con el tamaño del rotor. Los grandes rotores tendrán menor velocidad rotacional que los rotores pequeños para alcanzar la misma velocidad en

punta de pala.

Smeaton observó que cuando los aerogeneradores no soportan ninguna carga, las grandes turbinas tienen menor velocidad de giro que las pequeñas del mismo tipo.

VELOCIDAD EN PUNTA DE PALA

Ahora comprobaremos si el rotor grande tiene menor velocidad de giro que el pequeño cuando el aerogenerador no soporta ninguna carga.

Este ejercicio requiere un aerogenerador en el que se puedan montar dos rotores del mismo tipo pero con diferentes diámetros.

También se requiere un ventilador. Se necesitan además dos rotores rígidos de diferentes diámetros – descritos en las instrucciones de montaje. El resto de materiales se mencionan abajo. El ventilador debe estar en una posición fija respecto a los rotores.

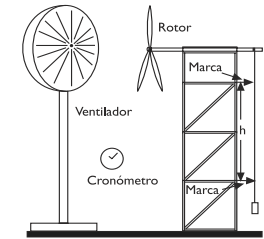
Haz dos marcas visibles en el aerogenerador (por ejemplo fijando un par de palillos). Ata un cordel al eje. Fija un corcho u otro objeto ligero al otro extremo del cordel. Cuando el corcho alcance el eje para el rotor. Si dejas que gire alrededor del eje puede dañar a alguien. Utiliza un cronómetro para ver cuánto tiempo le cuesta a la turbina levantar el corcho entre las dos marcas.

Rotor pequeño: Izar el corcho le cuesta ____ s.

Rotor grande: Izar el corcho le cuesta ____ s.

¿El rotor grande giró más lentamente que el pequeño?

EJERCICIO. Halla la velocidad en punta de pala realizando un par de medidas más. Mide el diámetro d_{eje}



del eje del aerogenerador utilizando p.ej. un pie de rey. Calcula la circunferencia del eje como $2 \cdot \pi \cdot r_{\text{eje}}$, donde $r_{\text{eje}} = \frac{1}{2}d_{\text{eje}}$. Mide la distancia h entre los dos puntos. El número de rotaciones puede hallarse como

$$n = \frac{h}{2 \cdot \pi \cdot r_{\text{eje}}}$$

Fíjate en que n no es necesariamente un entero. Si el tiempo de izado entre las dos marcas es t , el tiempo de rotación T puede calcularse como

$$T = \frac{t}{n}$$

La velocidad en punta de pala puede hallarse ahora midiendo el diámetro del rotor d . Hazlo tanto para el rotor pequeño como para el grande. ¿Has obtenido la misma velocidad en punta de pala?

EJERCICIO. Los grandes aerogeneradores giran menos revoluciones por minuto que los pequeños del mismo tipo cuando el aerogenerador no lleva ninguna carga. Explica este hecho de acuerdo con la primera ley básica de Smeaton.

POTENCIA DE UN AEROGENERADOR

En los periódicos se dice p.ej. que los aerogeneradores son de 750 kW o 1,2 kW. Es lo mismo que cuando decimos que una bombilla es de 40 W o 60 W. W es el vatio, la unidad utilizada para medir la potencia.

La potencia es una medida de la velocidad a la que una energía es convertida o transferida. Una bombilla de 60 W convierte la energía eléctrica de la red en energía eléctrica y calor dos veces más rápidamente que una de 30 W. La relación entre energía, potencia y tiempo es la siguiente:

$$\text{Energía} = \text{potencia} \cdot \text{tiempo}$$

JULIOS Y VATIOS

Si la energía se mide en julios, J, y la potencia en vatios, W, estas unidades son las que corresponden a la fórmula $\text{energía} = \text{potencia} \cdot \text{tiempo}$ cuando el tiempo se mide en segundos, s.

Una bombilla de 30 W convierte en 60 s una cantidad de energía:

$$\text{Energía} = \text{potencia} \cdot \text{tiempo} \text{ o } 30 \text{ W} \cdot 60 \text{ s} = 1800 \text{ J}$$

Observa que $\text{W} \cdot \text{s} = \text{J}$. En el mismo intervalo de tiempo una bombilla de 60 W convierte el doble de energía:

$$\text{Energía} = 60 \text{ W} \cdot 60 \text{ s} = 3600 \text{ J}$$

EJERCICIO 9. Calcula en J cuanta energía es convertida por una bombilla de 60 W que está funcionando durante 2 horas. Calcula el tiempo que le cuesta a una bombilla de 60 W convertir 9000 J.

KILO Y MEGA

Las cifras con varios dígitos no son prácticas, por lo que resulta útil introducir abreviaciones, como k y M, p.ej. kW y MW. Las abreviaciones k y M significan kilo y mega, y representan mil y un millón:

$$\text{kilo: } k = 1000 = 10^3, \text{ mega: } M = 1000000 = 10^6$$

Los aerogeneradores modernos entregan energía eléctrica a los consumidores a través de la red eléctrica. Un aerogenerador de 750 kW es un aerogenerador de 750.000 W, y un aerogenerador de 1,2 MW es un aerogenerador de 1.200.000 W. Estas cifras indican la potencia máxima que el aerogenerador puede entregar a la red eléctrica.

Ahora entendemos que la unidad kWh aparezca en la factura eléctrica. Cuando en el contador aparece que se ha consumido 1 kWh de energía, puede ser que se haya convertido 1 kW de potencia durante 1 hora o 0,5 kW durante 2 horas, p.ej. La h en kWh es la abreviación de hora. Sabiendo que una hora equivale a $60 \cdot 60 \text{ s} = 3600 \text{ s}$, podemos calcular que 1 kWh es en julios:

$$1 \text{ kWh} = 1000 \text{ W} \times 3600 \text{ s} = 3,6 \times 10^6 \text{ J} = 3,6 \text{ MJ}$$

Por lo tanto, 1 kWh son 3,6 MJ.

MULTIPLICADORES

Los aerogeneradores más modernos se construyen de forma que giren a una velocidad de rotación ideal y constante. Esta velocidad se encuentra llevando a cabo pruebas similares a las citadas más arriba. Pero el generador de una turbina eólica necesita típicamente una velocidad de giro de 25 revoluciones por segundo, por lo que entre el rotor y el generador se coloca un multiplicador.

¿Este aumento de la velocidad de giro tiene como resultado una mayor cantidad de energía o potencia? No, aquí también rige el Principio de Conservación de la Energía. Realmente parte de la energía es transferida al entorno – las partes giratorias del multiplicador rozan unas con las otras, y parte de la energía rotacional se convierte en energía calorífica en las partes del multiplicador y de los rodamientos. El propósito es convertir la mayor cantidad de energía posible en energía eléctrica, e intentar reducir la energía calorífica en los rodamientos y en las engranajes del multiplicador.

CARGAS PESADAS

Los engranajes no aumentan la energía o la potencia producida a partir del viento. Pero un engranaje puede ser utilizado para levantar objetos pesados. Para levantar objetos más pesados se necesita más energía. Pero la energía del viento, y por tanto la potencia de un aerogenerador, no aumenta. Por tanto, lo que hace el engranaje es aumentar el tiempo utilizado para levantar el objeto, según la fórmula:

$$\text{Energía} = \text{potencia} \cdot \text{tiempo}$$

que sigue aplicándose – si la energía aumenta y la potencia es la misma, entonces el tiempo debe también aumentar.

Compara como tu aerogenerador puede levantar objetos pesados con y sin un engranaje.

Puedes también utilizar el método del aparejo de poleas, descrito en las instrucciones de construcción.

ENERGÍA POTENCIAL

La energía de un peso que se eleva sobre el nivel del suelo se llama energía potencial. En el caso de un aerogenerador que soporta un peso, una parte de la energía del viento es convertida, por lo tanto, en energía potencial en el peso.

La energía potencial se define como $m \cdot g \cdot h$, donde m es la masa del cuerpo, h es la altura a la que el cuerpo se eleva y g es la constante conocida como aceleración de la gravedad, que varía según tu posición en la Tierra.

Es fácil entender la definición $m \cdot g \cdot h$. La energía potencial es proporcional a la masa m . Si la masa es el doble de grande, la cantidad de energía es también el doble. La energía potencial también es proporcional a la altura h . Si el cuerpo o el peso se eleva el doble de altura, la energía potencial es también dos veces mayor.

ACELERACIÓN GRAVITACIONAL

El valor de g varía entre $1,78 \text{ m/s}^2$ y $9,82 \text{ m/s}^2$ dependiendo de la latitud a la que te encuentres. Puedes encontrar el valor en un libro de física o en una enciclopedia. Observa que en este caso la unidad m/s^2 equivale a N/kg.

El valor de la aceleración de la gravedad: $g = \text{m/s}^2$.

EJEMPLO. En Dinamarca, la aceleración de la gravedad es $g = 9,82 \text{ m/s}^2$. Si una masa de $m = 0,200 \text{ kg}$ se eleva a una altura $h = 0,20 \text{ m}$ tenemos:

$$\begin{aligned} \text{energía} &= m \cdot g \cdot h = \\ &0,200 \text{ kg} \cdot 9,82 \text{ m/s}^2 \cdot 0,2 \text{ m} = \\ &0,3928 \text{ J} \approx 0,39 \text{ J}. \end{aligned}$$

MEDICIÓN DE LA POTENCIA DE SALIDA DEL ROTOR

Compararemos ahora los rotores en función de la potencia que generan. Se puede hacer de la siguiente manera: el aerogenerador entrega una energía potencial $m \cdot g \cdot h$ a la carga. Utiliza un cronómetro para medir el tiempo. La potencia se puede hallar usando la fórmula general: energía = potencia · tiempo. Esta fórmula puede describirse como:

$$\text{potencia} = \frac{\text{energía}}{\text{tiempo}}$$

Intenta averiguar cuál de los rotores entrega más potencia.

Los parámetros del ventilador deben ser los mismos durante todos los ensayos del rotor. Hemos visto que las mediciones de la velocidad del viento no son válidas cuando el ventilador crea demasiadas turbulencias - esto es, pequeñas ráfagas de viento aleatorias.

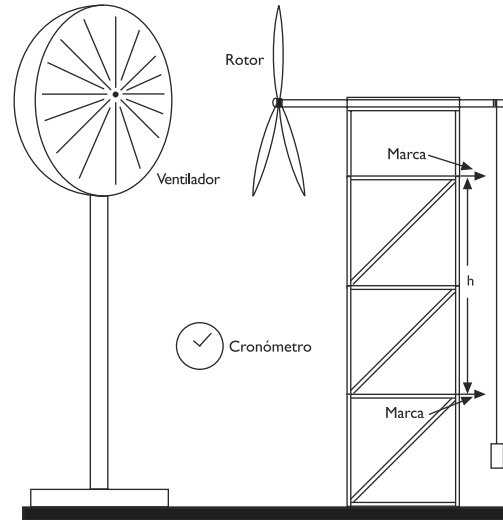
MATERIALES

Aerogenerador. Ventilador. Cronómetro. Balanza. Cordel. Uno o varios pesos para generar la carga - preferiblemente, uno ligero y otro pesado. Dos o más rotores diferentes. Marcadores de posición.

EL EXPERIMENTO

Empieza creando la disposición que se muestra. El ventilador debe situarse en la misma posición respecto al rotor durante todos los experimentos, con el fin de asegurar las mismas condiciones para cada rotor.

Escoge un par de marcas de posición naturales, o usa un par de palillos u otro tipo de marcas, que se utilizan para señalar cuando el peso supera una cierta altura. Selecciona una carga y averigua lo



que pesa poniéndola en la balanza. La masa es: $m = \text{___ kg}$.

Mide la distancia entre las marcas de posición: $h = \text{___ m}$.

La energía en julios que se transfiere a la carga se calcula multiplicando los valores de m (en kg), h (en m) y g (m/s^2): energía = $m \cdot g \cdot h = \text{___ J}$.

Ahora sólo necesitamos medir el tiempo que tarda el peso en elevarse una altura h . Empieza a cronometrar cuando el peso pasa la primera marca. Para el cronómetro cuando pase la segunda marca. Cuando el peso alcance el eje, para el rotor. Si lo dejas girar alrededor del eje, podrás herir a alguien. El resultado del cronómetro: $t = \text{___ s}$. Si quieres, puedes repetir el ejercicio y calcular un tiempo promedio.

Halla la potencia de la salida del aerogenerador insertando en la fórmula la energía en J y el tiempo en s:

$$\text{potencia} = \frac{\text{energía}}{\text{tiempo}} = \text{___ W}$$

EJERCICIO. Calcula la potencia con los siguientes valores: $g = 9,82 \text{ m/s}^2$, $m = 0,250 \text{ kg}$, $h = 0,18 \text{ m}$ y $t = 17 \text{ s}$. Respuesta: potencia = $0,026 \text{ W}$.

Repite el experimento con los otros rotores.

DISCUSIÓN

¿Averiguaste que rotor entregaba la máxima potencia? Intenta (¡si puedes!) explicar porqué la potencia de salida de los rotores es diferente.

Podrías haber acertado independientemente de si has elegido el rotor grande o el rotor pequeño. Explicaremos esto en el experimento "Maximando la potencia"

Necesitas repetir el test varias veces con pesos de diferentes medidas para obtener una comparación correcta de los diferentes rotores. Intenta coger un peso diferente y haz la prueba de nuevo.

Lea más sobre este tema en el experimento "Maximando la potencia".

MAXIMANDO LA POTENCIA

Si una carga es demasiado pesada, el aerogenerador no será capaz de levantarlo, con lo que la turbina no transferirá ninguna potencia a la carga. Por otro lado, si no hay ninguna carga en el aerogenerador, éste no transferirá ninguna potencia. Entre estos dos extremos, el aerogenerador debe tener una *producción de potencia máxima*.

Intentaremos encontrar la carga del aerogenerador que dará la máxima producción de potencia. Si varías la masa de la carga m , y al mismo tiempo mides la potencia como en el experimento "Medición de la potencia de salida del rotor", entonces encontrarás la máxima producción de potencia. Dibuja la masa de la carga m en un sistema de coordenadas, con la masa de la carga en el eje principal (eje x), y la producción de potencia en el eje secundario (eje y). Une los puntos dibujando una línea entre ellos (en una curva suave). Encuentra la máxima producción de potencia y la masa correspondiente. A una curva así se le denomina curva característica masa-potencia.

Realiza el ensayo con diferentes tipos de rotor y compara las curvas. Smeaton también llevó a cabo este tipo de experimento.

EJERCICIO. De acuerdo con Smeaton, la máxima producción de potencia de un aerogenerador es proporcional al área barrida por el rotor. Si tenemos dos rotores del mismo tipo donde el área barrida por uno de ellos es el doble que la del otro, debemos esperar que la potencia máxima producida por el rotor más grande sea también dos veces mayor.

Prueba dos rotores del mismo tipo pero de diferentes diámetros. Halla la máxima producción de potencia de cada uno de ellos. Calcula la relación entre las dos potencias (divide un valor por el otro). Mide los diámetros de los dos rotores y calcula la relación entre las áreas correspondientes (divide un valor por el otro).

¿Son las dos relaciones las mismas que halló Smeaton?