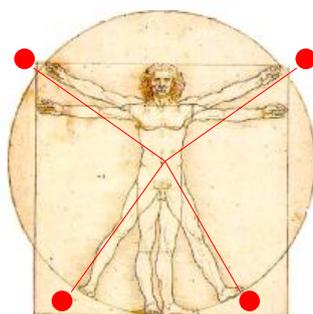


TECNOLOGÍ@ y DESARROLLO

Revista de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente

VOLUMEN XV. AÑO 2017

SEPARATA



NUEVO CONCEPTO DE GENERACION EOLICA. AEROGENERADOR SIN PALAS POR VORTICIDAD

Miguel Ángel Sánchez Hidalgo, Ricardo Atienza Pascual



UNIVERSIDAD ALFONSO X EL SABIO
Escuela Politécnica Superior
Villanueva de la Cañada (Madrid)

© Del texto: Miguel Ángel Sánchez Hidalgo, Ricardo Atienza Pascual
Mayo, 2017.

<http://www.uax.es/publicacion/nuevo-concepto-de-generacion-eolica-aerogenerador-sin-palas-por-vorticidad.pdf>

© De la edición: *Revista Tecnol@ y desarrollo*

Escuela Politécnica Superior.

Universidad Alfonso X el Sabio.

28691, Villanueva de la Cañada (Madrid).

ISSN: 1696-8085

Editor: Javier Morales Pérez – tecnologia@uax.es

No está permitida la reproducción total o parcial de este artículo, ni su almacenamiento o transmisión ya sea electrónico, químico, mecánico, por fotocopia u otros métodos, sin permiso previo por escrito de la revista.

NUEVO CONCEPTO DE GENERACION EOLICA. AEROGENERADOR SIN PALAS POR VORTICIDAD

Miguel Ángel Sánchez Hidalgo^(a), Ricardo Atienza Pascual^(b)

(a) Ingeniero Industrial. Responsable de eficiencia energética y mantenimiento del Complejo Hospitalario de Ávila y del Hospital Universitario Fundación de Alcorcon. Madrid. OHL Servicios. Instituto de Gestión Sanitaria. Teléfono: 650 510 319, e-mail: miguelangelsh@hotmail.es

(b) Doctor Ingeniero Aeronáutico. Jefe del Centro de Ensayo de Programas Aeroespaciales Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial 'Esteban Terradas'. Jefe de Estudios de Grado en Ingeniería Aeroespacial Escuela Politécnica Superior, Universidad Alfonso X el Sabio Teléfono: 918 105 793, e-mail: ratiepas@uax.es

RESUMEN: Dentro de las llamadas energías renovables, una de las más populares y eficiente es la energía eólica, la cual emplea el viento como fuente de energía.

Con el fin de transformar la energía que se encuentra en el viento, en electricidad, los dispositivos más utilizados son los llamados aerogeneradores multipala. A pesar de las evoluciones tecnológicas evidentes, existen ciertos aspectos que necesitan una mejora, como es, la presencia de elementos mecánicos implican desgastes y elevados costes de mantenimiento, logística compleja debido al incremento del tamaño de las turbinas, y alto impacto visual acentuado por su movimiento de rotación.

Por todo ello existe una necesidad de una segunda generación de aerogeneradores. La tarea entra de lleno en la investigación y desarrollo de un equipo novedoso para la generación de energía a partir del viento, que permita eliminar o mejorar los puntos anteriormente señalados.

PALABRAS CLAVE: Vortices de Von Karman, Resonancia, Reynolds, Strouhal,

ABSTRACT: Within the so-called renewable energies, one of the most popular and efficient is wind energy which of course uses the wind as its primary source of energy.

In order to transform the energy in the wind into electricity, the most widely used devices are called multiblade turbines. Despite the obvious technological developments, there are certain aspects that need improvement, as is the presence of mechanical elements involve wear and high maintenance costs, complex logistics due to the increased size of the turbines, and high visual impact accentuated by its rotation.

Therefore there is a need for a second generation of wind turbines. The task falls squarely in the research and development of a novel method for generating energy from wind, so as to eliminate or improve the aforementioned points team.

KEY-WORDS: *Vortex Bladeless, Vortex Shedding, Von Karman, Reynolds, Strouhal,*

SUMARIO: 1. Introducción 2. Cambio de concepto eólico 3. Partes del equipo 4. Vortices de Von Karman 5. Principio de diseño del mastil 6. Generación de resonancia 7. Sistema de sintonizado 8. Generación de energía eléctrica 9. Bibliografía

1. Introducción

La promoción y dinamismo de nuevas formas de energías renovables, forman parte de la política energética de la Unión Europea de acuerdo con el artículo 194 (1)c TFUE [1]. El sector energético es uno de los pilares del crecimiento, de la competitividad y del desarrollo de las economías modernas.

A pesar de que es mundialmente aceptado que la demanda de energía seguirá creciendo en los próximos años, la participación de los combustibles fósiles en la matriz energética del mundo debe decrecer del 82% al 60 % en 2035 para luchar contra la desaparición progresiva de los combustibles fósiles como recurso primario en la Tierra. Por otro lado, las fuentes de energía bajas en carbono deben cumplir con alrededor del 30 % de la demanda de energía primaria, procedente de recursos renovables, como las previsiones de la AIE (International Energy Agency).

La Unión Europea (UE) ha sido muy activa en la promoción de objetivos en materia de clima y de energía a través de su directriz 20-20-20 [2]. Estos objetivos tienen como finalidad reducir en un 20 % las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), aumentar en un 20% la eficiencia energética en la UE y alcanzar una meta de 20% de energías renovables en el consumo total de energía en la UE antes de 2020. [3]

Dentro de este contexto, se presenta la energía eólica como uno de los principales motores de dinamismo y crecimiento energético sostenible.

La potencia generada a partir de la energía eólica ha crecido exponencialmente en los últimos años, llegando hasta cifras de 370 GW en diciembre de 2014 [Fig.1.1]

En 2014, Dinamarca generaba alrededor del 40 % de su electricidad a partir del viento.

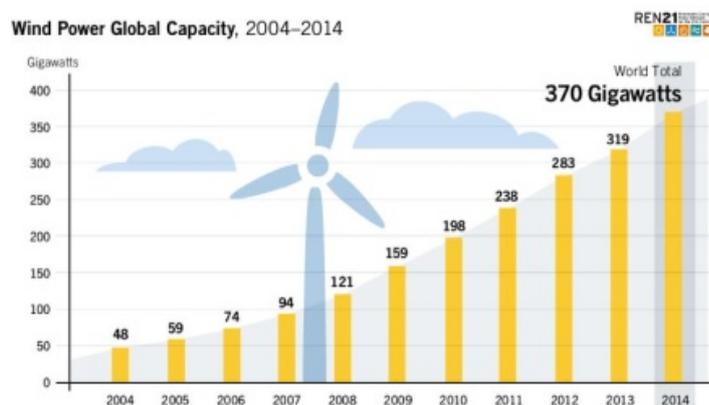


Fig. 1.1. Crecimiento global de la potencia instalada. Fuente: REN21, the Renewable Energy Policy Network for the 21st Century

Los aerogeneradores convencionales más extendidos son los aerogeneradores de eje horizontal. [Fig.1.2]. En las últimas décadas, este tipo de aerogeneradores ha sufrido un

gran desarrollo y optimización de sus componentes, lo que supone que en la actualidad se trata de una tecnología muy madura y consolidada.



Fig.1.2: Aerogeneradores de eje horizontal. Fuente: Enercon

Por ello se necesita reinventar una segunda generación de equipos eólicos que realmente supongan un desafío tecnológico, ligado a un alto compromiso medioambiental [Fig.1.3].



Fig.1.3: Concepto Vortex. Fuente: Vortex Bladeless

Vortex no sólo elimina las palas. Vortex ha sido diseñado para simplificar al máximo su diseño, evitando tener partes en contacto (sin engranajes, conexiones, etc.) . Eso hace que Vortex sea más barato y fácil de mantener. Vortex no produce ruido audible (puesto que su frecuencia está por debajo de los 20 Hz).

Por otro lado, Vortex resulta más seguro para las aves, que a menudo sufren colisiones con las palas de los aerogeneradores convencionales.

2. Cambio de concepto eólico

Conceptualmente el diseño del equipo surge a partir de las imágenes sobre el colapso del Puente de Tacoma Narrow en 1940 [Fig. 2]. Este desastre es popularmente conocido en el mundo académico y estudiado por ingenieros y científicos en discusiones de fenómenos aeroelásticos en estructuras. Siempre este fenómeno ha sido considerando como perjudicial y destructivo.

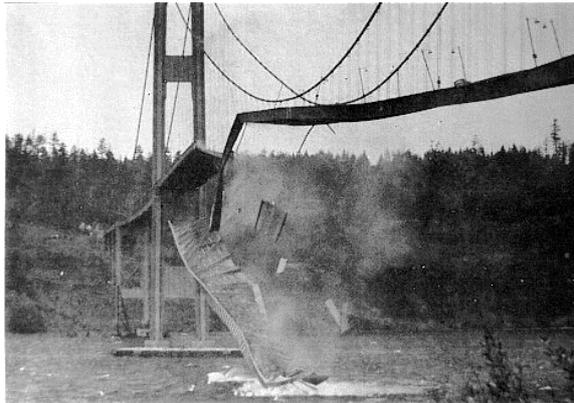


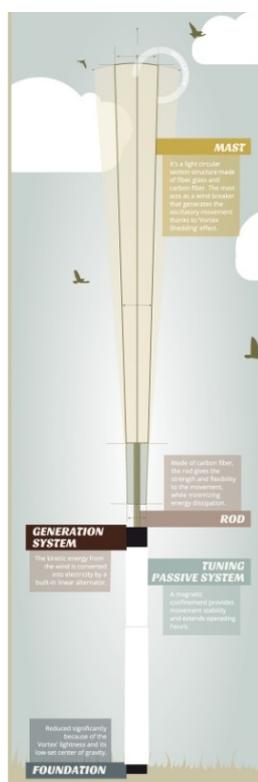
Fig.2: Colapso del Puente de Tacoma Narrow. Fuente: Leonard Coatsworth

El fenómeno acaecido sobre el Puente de Tacoma Narrow, se trata de un fenómeno particular de la aeroelasticidad dinámica, concretamente Flameo. Un principio diferente al fenómeno que origina el movimiento del equipo objeto del presente artículo (Calle de Torbellinos de Von Karman, caso típico de Bataneo), pero que deja entre ver como una estructura que no ha sido diseñada para absorber energía del viento, es capaz de absorber dicha energía hasta el punto de llegar a la rotura estructural.

Pues bien, se puede intuir que si se diseña deliberadamente una estructura para fomentar tal efecto, se encontrase otra manera prometedora de generar energía a partir del viento.

3. Partes del equipo

Vortex es una estructura bastante simple, con 5 partes principales: mástil, núcleo, sistema de generación, sistema de sintonización y cimentación [Fig.3.1].



El aerogenerador resonante por vorticidad consiste en un dispositivo vertical, semirrígido y cimentado en la superficie del terreno. La parte más visible es un bloque vertical o mástil que al no tener partes móviles (reductoras, engranajes, ejes, rotores, etc.), no necesita de lubricación o cambio de piezas por desgaste o fatiga. Está fabricado parcialmente por materiales con alto acoplamiento mecánico.

El mástil tiene sección circular en toda su longitud con objeto de obtener un comportamiento idéntico independientemente de la dirección del aire incidente. Su diseño busca de manera deliberada entrar en resonancia con el aire que incide sobre su superficie torsionándose alternativamente en un plano aproximadamente perpendicular a la dirección del viento. De esta manera, la energía aprovechable es la que transita por el área barrida por el mismo durante su oscilación.

Fig. 3.1: Componentes del Vortex. Fuente: Vortex Bladeless

Se reduce la cantidad de materia prima utilizada para la fabricación, lo que reduce los costes de producción y tiempos de fabricación. Además, al no tener partes móviles en contacto, significa que en realidad hay muy pocos componentes que pueden fallar, lo que prolonga el tiempo entre intervalos de mantenimiento y permite tener menos tiempo de inactividad.

Como resultado, los costes de mantenimiento son bajos. El coste normalizado de la generación de energía (LCOE) para una instalación típica será 0,035 \$/kWh, incluyendo los costes de capital, operación y mantenimiento, el rendimiento, el arrendamiento de tierras, seguros y otros gastos administrativos. La figura 3.2 muestra que Vortex es un equipo altamente competitivo.

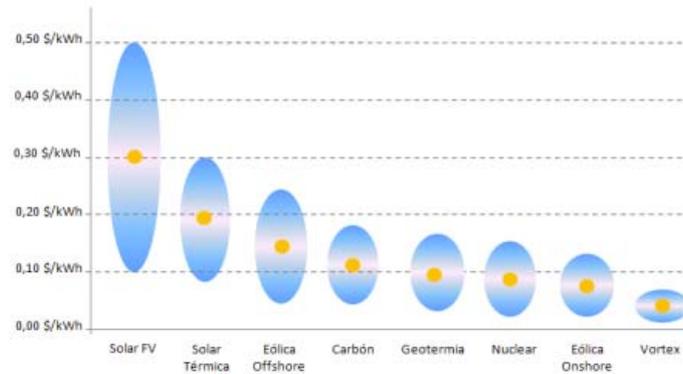


Fig. 3.2: Índice LCOE

4. Vórtices de Von Kármán

En lugar de capturar la energía a través del movimiento de rotación de una turbina, Vortex se aprovecha de lo que se conoce como la vorticidad. Se trata de un fenómeno aeroelástico que se produce cuando en un fluido se interpone una estructura sólida, generando tras de sí una secuencia coordinada de vórtices (calle de Von Kármán) [Ec. 4.1]

$$F_v = \frac{S \cdot V}{h} \quad \text{Ec. 4.1}$$

En ella V es la velocidad del viento y S el número adimensional de *Strouhal*. Esta sencilla fórmula no es rigurosamente válida para el caso que nos atañe (fenómeno aeroelástico) pero es conceptualmente adecuada para el objetivo perseguido por el presente documento.

Se generan dos fuerzas, conocidas como fuerza de sustentación (que se produce en dirección perpendicular a la dirección del viento y cuyo sentido varía alternativamente de signo a la frecuencia F_v) y fuerza de arrastre (paralela a la dirección del viento y en caso de ser laminar y estacionario produce una torsión fija en el tiempo). [Fig.4.1]

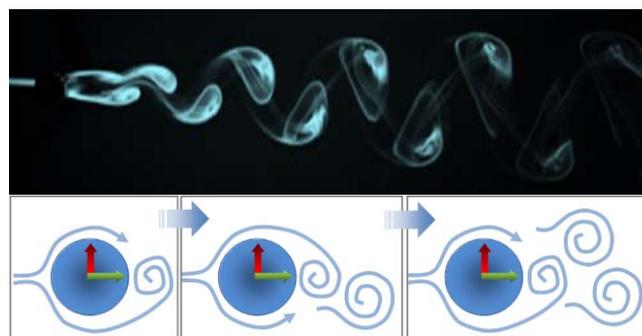


Fig. 4.1: Fuerza de sustentación y de arrastre generada por los vórtices de Von Kármán

Debido a la estela de vórtices generada (calle de Von Kármán) las oscilaciones en la fuerza de sustentación, se producen a la frecuencia del desprendimiento de los vórtices. El mástil comienza a oscilar, y el sistema de generación, convierte la energía elástica en electricidad.

Teniendo éste fenómeno una periodicidad que dependerá tanto de la velocidad de la corriente, la longitud característica del cuerpo (en este caso, el diámetro), la densidad y viscosidad del fluido. [Fig.4.2]

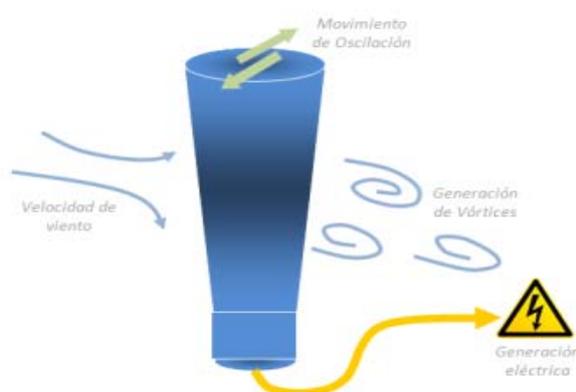


Fig. 4.2: Oscilación inducida por vórtices de Von Kármán

La mayor innovación de este tipo de aerogeneradores por vorticidad reside en la simplicidad del sistema en sí y el método eficaz de captar la energía del viento.

5. Principio de diseño del mástil

Basándose en el concepto de la vorticidad, se diseña el captador de energía, denominado mástil, que consiste en una estructura rígida con simetría de revolución, cuyo eje se coloca de manera vertical, y cuyo perfil se diseña en base a distintos factores

del equipo (mínimo peso, uniformidad de “vorticidad” de salida, robustez...) Su objetivo es el de conseguir maximizar la energía extraída del viento. Esto es lo que, en la eólica convencional, serían las palas.

La sección transversal del mástil es circular con la intención que el comportamiento del equipo sea similar independientemente de la dirección del viento, evitándose así la necesidad de orientar el equipo.

En cambio, la sección no es constante a lo largo de su longitud, sino que la sección va creciendo longitudinalmente. La razón de esta característica de diseño se fundamenta en primer lugar en que la velocidad del viento se incrementa en la medida que la altitud crece según la Ley Exponencial de Hellman. [Fig. 5.1]

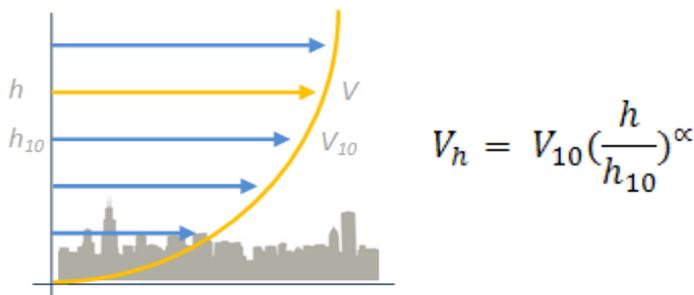


Fig. 5.1: Ley exponencial de Hellman.

La siguiente consideración a tener en cuenta en el diseño del mástil, es que la frecuencia de desprendimiento de estos vórtices varía con respecto a la velocidad del fluido. Lo cual se traduce en que en una estructura recta, la frecuencia de desprendimiento de los vórtices es diferente para cada sección. Teniendo una frecuencia no homogénea.

Según la fórmula de la figura 4.2, para tener una frecuencia constante en toda la longitud del mástil, el diámetro debe incrementarse con la sección [Fig. 5.2].

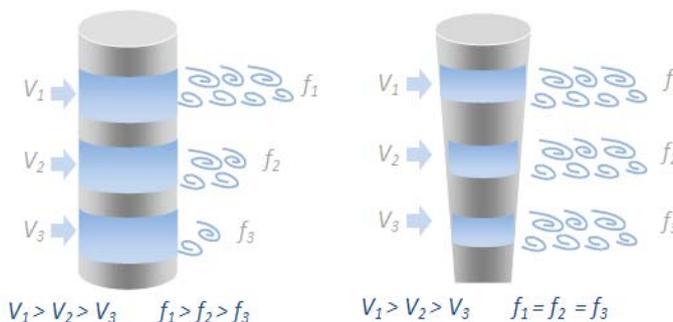


Fig. 5.2: Generación de vórtices en el mástil

Como resultado de ello, los diámetros están diseñados para ser mayores en la sección superior. Los datos obtenidos analíticamente, coinciden con los resultados experimentales obtenidos en el túnel de viento. [Fig. 5.3]



Fig. 5.3: Modelo en túnel de viento



Fig. 5.4: Mástil impreso en 3D

En la actualidad, se está desarrollando una forma más eficiente del mástil usando el túnel de viento y simulación de fluidos CFDs [Fig. 5.4]. El trabajo se centra en el diseño de la zona superior del mástil, la cual se estrecha para reducir la turbulencia generada en la punta, dicha turbulencia, denominada efecto cabeza, degrada la eficiencia del equipo.

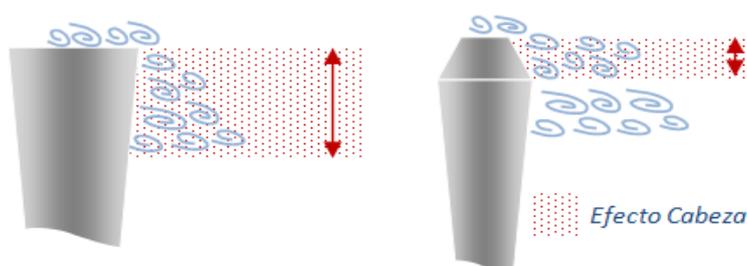


Fig. 5.5: Optimización de la turbulencia en la zona alta. Efecto Cabeza.

En base a los primeros estudios CFD se observa una distorsión que rompe la sincronía de la estela de vórtices, provocando una caída en los coeficientes de sustentación. Se denominamos efecto cabeza, [Fig. 5.5] debido a que el origen de la perturbación se sitúa en la tapa superior del mástil. La geometría original del mástil (cabeza plana) hacía que en la parte superior del dispositivo aparecía una depresión. Esto era debido a que el fluido se veía obligado rodear al mástil de una manera distinta al resto de secciones. Esto provocaba una modificación del número de Strouhal de las últimas secciones, y por ello una pérdida de rendimiento total. En base a análisis CFD se

diseñan alternativas que minimizan este efecto, posteriormente ensayadas en túnel de viento con éxito.

6. Generación de resonancia

Poniendo como base el fenómeno de resonancia mecánica, el siguiente principio de funcionamiento es la generación de movimiento, de modo que a partir de las fuerzas alternativas de los vórtices explicados anteriormente, se genera como resultante un movimiento alternativo. Esta resonancia mecánica, principalmente provoca un movimiento de grandes amplitudes sobre una estructura (amplificación dinámica), cuando dicha estructura es excitada a unas frecuencias muy específicas, conocidas como frecuencias de resonancia.

Este es un concepto general y, en algunas aplicaciones se aprovecha, aunque en la mayoría de los casos es pernicioso y se tiende a eliminarlo.

Sin embargo, para el caso de Vortex, es la base de funcionamiento. La configuración del equipo se basa en montar el mástil sobre una varilla flexible, que a todos los efectos se comporta como una viga empotrada-libre colocada en vertical. Con este montaje se busca excitar el primer modo de vibración a flexión de la varilla.

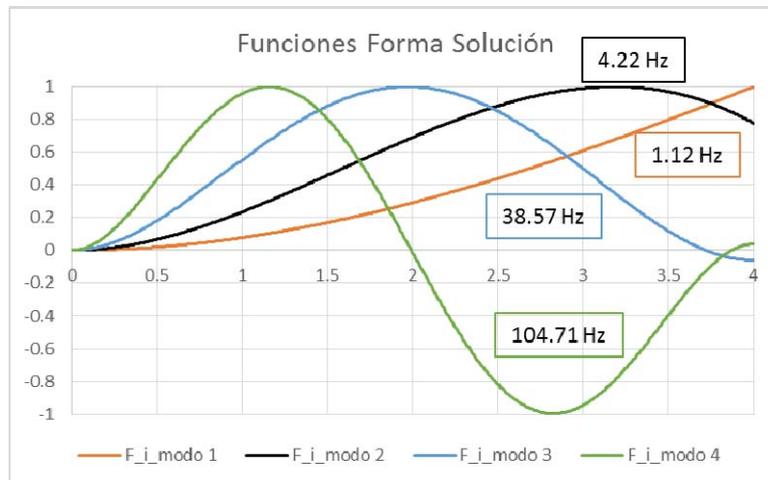


Fig. 6.1 Graficado de modos de vibración obtenido en hoja de cálculo

Cuando la velocidad del aire se aproxima a aquella a la que la frecuencia de aparición de vórtices y de la estructura coincide, entonces aparece una amplificación dinámica del movimiento, y el mástil empieza a oscilar de manera estable a la frecuencia de resonancia del equipo, frecuencia a la que llamaremos situación estacionaria.

Como toda estructura, el dispositivo tiene varios modos espaciales de oscilación. Para un mástil fijado en un extremo al suelo, el denominado primer modo de oscilación es aquel en el que un extremo se mantiene estático y el extremo opuesto, el más elevado, sufre un recorrido máximo. Si la frecuencia de oscilación natural del mástil f_n coincide con la frecuencia F_v en la que él mismo genera los vórtices, la estructura y el régimen turbulento se sintonizan, entrando el conjunto en resonancia y maximizando así la capacidad de absorción energética.

7. Sistema de sintonizado

Se denomina sintonizado a la capacidad de modificar la frecuencia de resonancia del equipo en base a la velocidad del aire incidente.

El principio físico de funcionamiento en el que se basa la implementación de esta característica es conocido en la bibliografía como las ecuaciones del oscilador de Duffin [4]. Adaptando estas ecuaciones al modelo, se ha definido su comportamiento mecánico. Estos sistemas de ecuaciones describen como tiene que actuar un sistema físico para que, al aumentar la amplitud del movimiento, aumente su frecuencia de resonancia.

La tecnología desarrollada utiliza la resonancia con el fin de hacer oscilar el mástil a partir de vórtices de Von Kármán. Sin embargo, la velocidad del viento cambia constantemente, por lo que la frecuencia a la que aparecen los vórtices también cambia de manera constante. Esto hace que el rango de velocidades de viento a las cuales la frecuencia de oscilación natural coincide con la frecuencia de generación de vórtices sea sumamente reducida, y en consecuencia un equipo de muy baja eficiencia. Para resolver este problema, se desarrolla un sistema de sintonizado adaptado a Vortex.

La solución para ampliar el rango es añadir un sistema de imanes permanentes (confinamiento magnético) trabajando a repulsión [Fig. 7.1], que en base al diseño y la colocación de los mismos, consigue generar un sistema que aumente la frecuencia de resonancia con la amplitud de manera pasiva, es decir actúa sin la necesidad de aplicar ningún control sobre él.

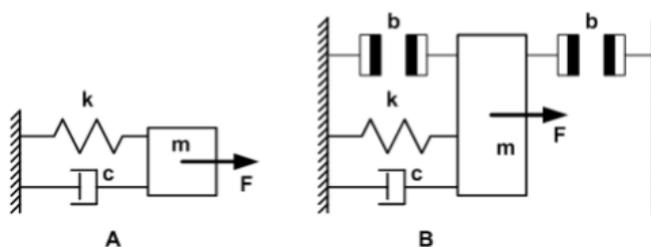


Fig. 7.1 Método repulsión para sintonización

El constructivamente todo ello se traduce principalmente en enfrentar dos anillos magnéticos concéntricos, dispuestos de manera que se repelen fuertemente [Fig.7.2]. De esta manera se hace coincidir la frecuencia natural con la frecuencia de generación de vórtices, para las distintas velocidades de viento.

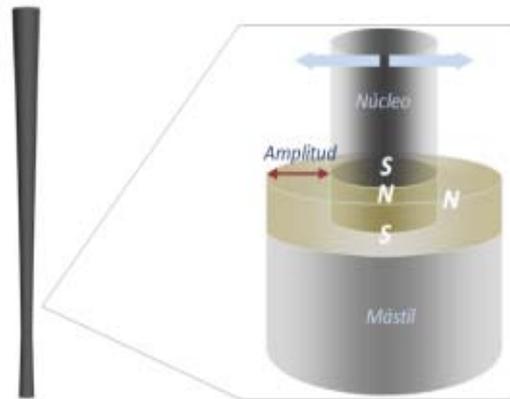


Fig. 7.2: Detalle sistema sintonizado

La frecuencia de oscilación natural se desarrolla a partir de la formula [Ec. 7.1]:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k(x)}{M}} \quad \begin{array}{l} f_0: \text{Frecuencia Natural} \\ K: \text{Constante Rigidez} \\ C: \text{Constante Amortiguamiento} \\ M: \text{Masa} \end{array} \quad [\text{Ec. 7.1}]$$

A mayor velocidad del viento, mayor es la fuerza de sustentación (dirección perpendicular al viento) y mayor es la fuerza de arrastre (dirección del viento).

Esto hace que la distancia [L] de la Fig. 7.3, entre los dos imanes disminuya, incrementándose en consecuencia la fuerza de repulsión. De manera similar al comportamiento de un resorte, pero con una rigidez variable en función del desplazamiento, al tratarse de una repulsión magnética.

Por lo que una fuerza elevada, se corresponde con una alta rigidez. En consecuencia, a mayor velocidad, mayor rigidez del mástil, tal y como se ilustra en la Fig. 7.3

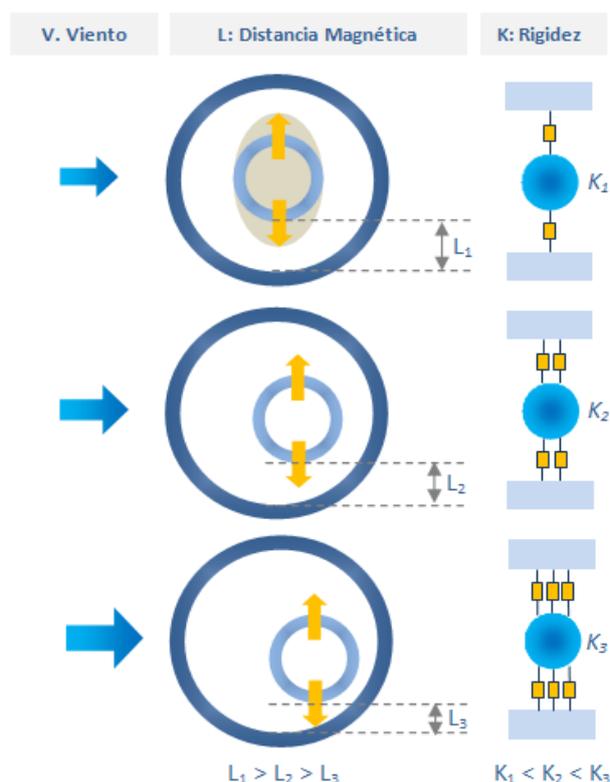


Fig. 7.3: Variación de la rigidez en función del desplazamiento

Como se ha mencionado anteriormente, una estructura rígida significa una elevada frecuencia de oscilación natural. En consecuencia, el sistema de sintonizado permite la sintonización de la frecuencia de oscilación natural con la frecuencia de desprendimiento de vórtices correspondiente, para una determinada velocidad de viento.

Por lo tanto mediante este sistema se amplía el rango de velocidades de viento en el que la amplitud del equipo es máxima y por tanto se maximiza el periodo de operatividad del equipo. [Fig. 7.4]

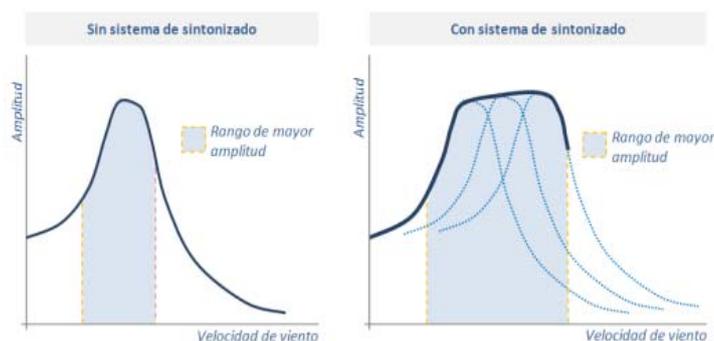


Fig. 7.4: Comparativa del rango de amplitud

El sistema presentado para hacer coincidir la frecuencia de oscilación natural con la frecuencia de desprendimiento de vórtices, y por tanto en entrar en una búsqueda deliberada de la frecuencia de resonancia de la estructura, está acorde a la filosofía del

proyecto, connotado por la máxima simplicidad del modelo y la ausencia de giros y contactos.

8. Generación de energía eléctrica.

Una de las posibilidades desarrolladas para el generar electricidad consiste en un alternador lineal vertical integrado por una bobina y un imán según se muestra en la Fig. 8.1. El movimiento oscilante del imán dentro de la bobina induce una electricidad basada en la ley de Faraday.

Si bien una de las mayores complejidades radica en que el movimiento horizontal del mástil debe ser convertido en un movimiento vertical alternativo del imán.

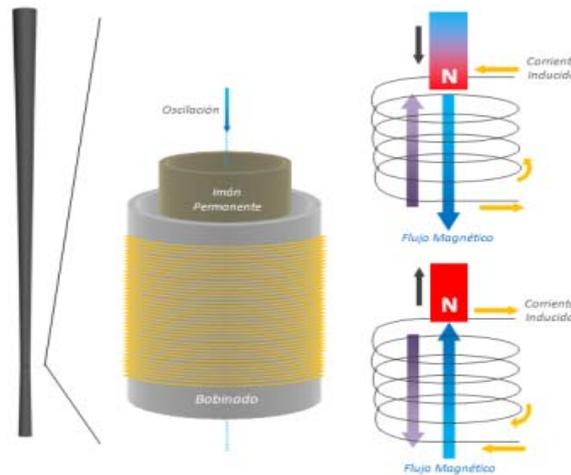


Fig. 8.1: Alternador lineal

El mecanismo desarrollado se muestra en la Fig. 8.2. (1) Se compone de dos cilindros, que están conectados entre sí mediante guías de fibra de carbono. Sobre el anillo exterior se coloca la bobina y el anillo interior se compone de un imán permanente. (2) Se enfrentan dos imanes, en forma de anillo, uno de ellos se sitúa en la parte inferior del mástil y el otro en la parte superior del cilindro interior. (3) Cuando los ejes de los dos anillos magnéticos son coincidentes, la fuerza de repulsión entre ellos se incrementa. Y dicha fuerza hace que el cilindro interior inferior se desplace y vibre. (4) Después, la oscilación del cilindro se repite debido a la propia tensión de las guías de fibra de carbono.

La energía eléctrica generada se realiza en corriente alterna, que mediante un rectificador se convertirá en corriente continua directamente aplicable.

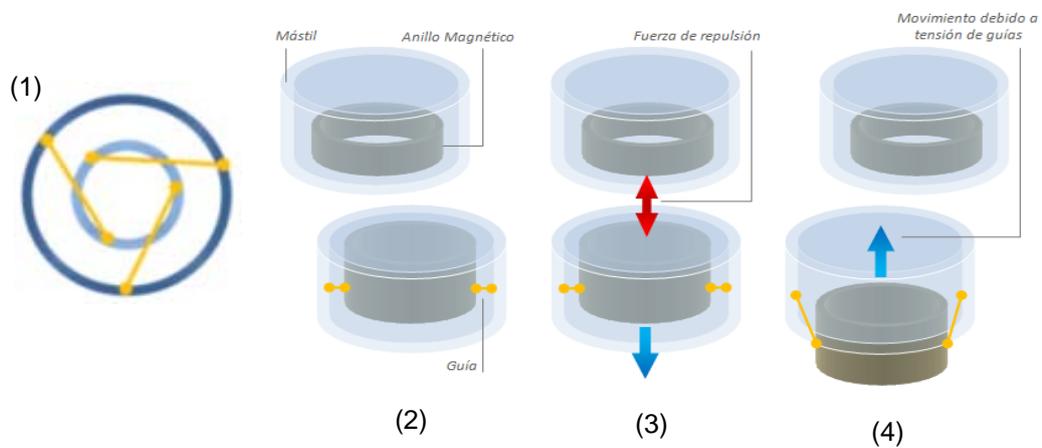


Fig. 8.2: Mecanismo de transformación del movimiento horizontal en vertical

9. Bibliografía.

- [1] <http://eurlex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX:12008E194:EN:HTML>
- [2] SET PLAN. <https://setis.ec.europa.eu/>
- [3] Asociación Mundial de Energía Eólica 2015
- [4] G. Duffing, Erzwungene Schwingungen bei Veränderlicher Eigenfrequenz., F. Vieweg U. Sohn, Braunschweig, 1918