

# Estado del arte sobre dispositivos activos y pasivos de control de flujo para turbinas eólicas

Iñigo Aramendia-Iradi, Unai Fernandez-Gamiz, Javier Sancho-Saiz y Ekaitz Zulueta-Guerrero  
 Universidad del País Vasco (España)

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/7807>

## 1. INTRODUCCIÓN

Hay muchas razones por las que cada vez se trabaja más en el desarrollo de fuentes alternativas de energía para la generación de electricidad. Algunas de ellas son la seguridad energética tras accidentes recientes como el de la planta nuclear de Fukushima en Japón, o el aumento de la demanda energética a través de economías emergentes como China, Brasil o India. Por otra parte, existe también una mayor concienciación en la sociedad sobre los efectos negativos que generan las fuentes tradicionales para el medio ambiente. En este punto, el desarrollo y la optimización de los sistemas de generación de energía renovable (eólica, termo-solar, biomasa, etc.) son fundamentales para poder competir a nivel de producción y rentabilidad frente a las fuentes tradicionales.

De acuerdo con la AEE (*Asociación Empresarial Eólica*), la capacidad de energía eólica instalada en España ha crecido exponencialmente en la última década, generando en 2013 una cantidad estimada de 54.478 GWh. Suficiente para abastecer a 15,5 millones de hogares (90% del total). Sin embargo, aunque el coste de la energía eólica ha descendido en esta última década, se requiere de una alta inversión inicial tecnológica, por lo que es necesario mejorar su ciclo de vida y su eficiencia para ser económicamente competitiva en términos de rentabilidad frente a las fuentes tradicionales u otras alternativas renovables.

## 2. OBJETIVOS DE MEJORA EN LAS TURBINAS EÓLICAS

La mejora de los aerogeneradores presenta 3 puntos clave:

1. Establecer límites superiores y limi-

tar el par y la potencia experimentada por el tren de transmisión, principalmente el eje de baja velocidad.

2. Minimizar la fatiga del rotor y otros componentes estructurales provocados por los cambios de dirección del viento, velocidad y turbulencias, así como los ciclos de funcionamiento variables del aerogenerador.
3. Maximizar la producción de energía.

Dentro de este último punto entra el concepto del coste de la energía (COE). Hay 3 variables independientes para calcular este valor tal y como se puede ver en la Ec. (1):

$$COE = \frac{\text{Energía obtenida en su ciclo de vida}}{\text{Costes Fijos} + \text{Coste O \& M}} \quad (1)$$

El objetivo de la estrategia de control depende de la región de operación de la turbina, la cual se determina con la velocidad del viento.

La curva se divide en 4 regiones tal y como se puede apreciar en la Fig. 1. En la región 1 la velocidad del viento es demasiado baja para generar energía. La región 2, que comprende entre la velocidad de corte ( $v_{cut-in}$ ) y la velocidad nominal ( $v_{rated}$ ), el generador trabaja por debajo de la potencia nominal (*rated power*). En la región 3, la salida de energía está limitada por la turbina. Esto sucede cuando la inten-

sidad del viento es suficiente para la turbina para alcanzar esta salida nominal de energía. La región 4 corresponde a vientos más fuertes, donde la potencia del viento es tan grande que puede generar daños y desperfectos en la turbina.

## 3. CLASIFICACIÓN DE LOS DISPOSITIVOS DE CONTROL DE FLUJO

Wood [1] desarrolló un esquema de 4 etapas, que permite clasificar los diferentes conceptos que forman parte de cada uno de los numerosos dispositivos de control del flujo.

### 1ª Etapa

Según la técnica empleada:

1. Dispositivo geométrico (G): Modifica la geometría y la forma del perfil y con ello el paso del flujo a través de él.
2. Dispositivo fluidico (F): Modifica el paso del flujo a través del perfil introduciendo o sustrayendo aire del flujo exterior.

### 2ª Etapa

Según la localización del dispositivo:

- Cerca del borde de ataque (*Leading edge*)
- Cerca del borde de salida (*Trailing edge*)
- En la mitad de la cuerda (*Mid-chord*)

### 3ª Etapa

Según como ajusta el dispositivo la curva de sustentación. Los dispositivos

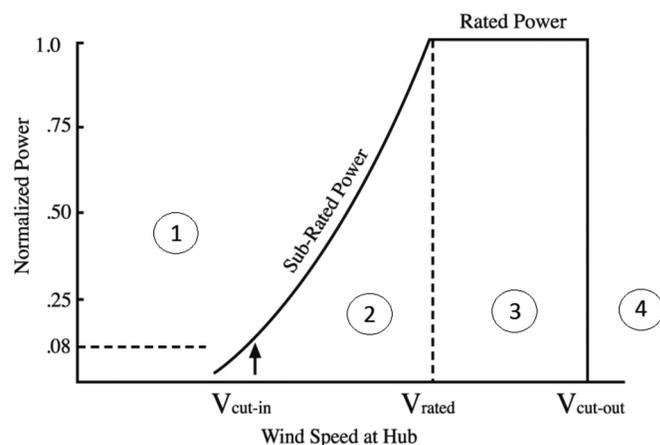


Fig. 1: Relación entre la velocidad del viento y la potencia

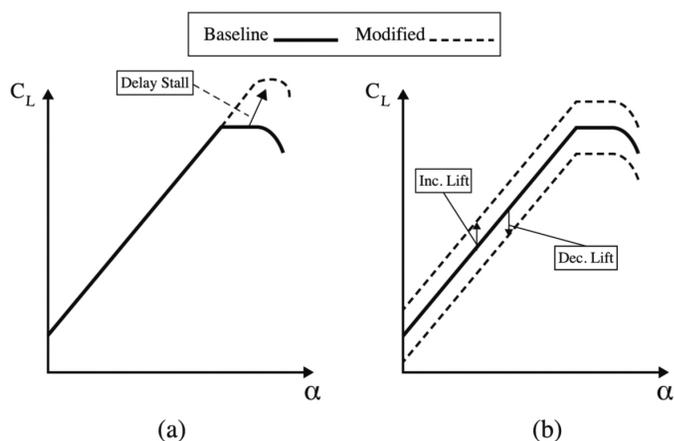


Fig. 2: Variación del coeficiente de sustentación ( $C_L$ ) en función del ángulo de ataque ( $\alpha$ )

de control de flujo modifican la curva de sustentación de un perfil de 2 formas (Ver Figura 2).

1. Desplazando la curva hacia arriba (aumentando la sustentación) o hacia abajo (reduciendo la sustentación).
2. Extendiendo la curva de sustentación hasta la entrada en pérdida (stall) a un mayor ángulo de ataque ( $\alpha$ ).

En una primera observación a la figura anterior, retrasar la entrada en pérdida (*stall*) solo incrementa la sustentación a altos ángulos de ataque. Es por ello que dispositivos basados en este concepto no son considerados una opción para la reducción de cargas y esfuerzos. Sin embargo, una idea presentada por Corten [2] supone una alternativa para emplear dispositivos basados en el retraso de la entrada en pérdida (dispositivos DS) y reducir cargas.

Sabemos que la fuerza de sustentación ( $F_L$ ) sigue la Ec. (2):

$$F_L = C_{L_{\max}} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^2 \quad (2)$$

Donde ( $\rho$ ) es la densidad del aire, ( $A$ ) es el área del perfil y ( $v$ ) la velocidad del

fluido sobre el perfil.

La idea de Corten es rediseñar el álabo de tal forma que la fuerza de sustentación sea igual con un dispositivo DS o sin dicho dispositivo DS. La densidad y la velocidad del aire sobre las palas serían iguales en las mismas condiciones. Añadiendo un dispositivo DS, como por ejemplo un *Vortex Generator* (VG), conseguimos aumentar el  $C_{L_{\max}}$ , por lo que en ese caso para conseguir una misma fuerza de sustentación podemos disminuir el área del álabo, o lo que es lo mismo, su cuerda.

Sin dispositivo DS

$$F_L = C_{L_{\max}} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^2 = C_{L_{\max}} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot (c \cdot b) \cdot v^2 \quad (3)$$

Con dispositivo DS

$$F_L = C_{L_{\max}} \uparrow \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \downarrow \cdot v^2 = C_{L_{\max}} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot (c \downarrow \cdot b) \cdot v^2 \quad (4)$$

Donde (c) y (b) son la longitud y el ancho del perfil aerodinámico, respectivamente.

#### 4ª Etapa

Según el dispositivo trabaje en condiciones estables o inestables (es decir,

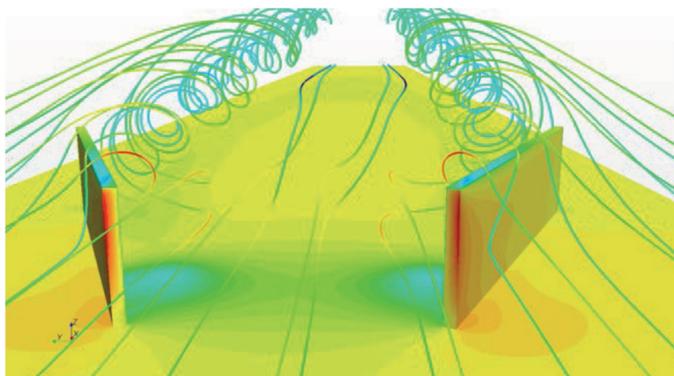


Fig. 3: Líneas de corriente sobre una placa plana con *Vortex Generators* (Fernández-Gámiz [4])

un dispositivo cuya posición varía con el tiempo según se requiera).

## 4. TIPOS DE DISPOSITIVOS

Según el funcionamiento del dispositivo se pueden clasificar en pasivos y activos. A lo largo de este artículo se van a describir algunos de estos sistemas dentro de cada categoría.

1. Control pasivo
  - a. *Vortex Generators*
  - b. *Microtabs*
  - c. *Serrated trailing edges*
  - d. *Fences*
  - e. *Spoilers*

2. Control activo

- a. *Trailing-edge flaps*
- b. *Synthetic jets*
- c. *Air Jet Vortex Generators*

Los controles pasivos mejoran el rendimiento de la turbina y/o reducen las cargas sin gasto de energía externa mientras que los controles activos requieren energía externa. Johnson et al. [3] realizaron un pequeño análisis y clasificación de 15 diferentes dispositivos de control de flujo para la mejora aerodinámica de los aerogeneradores y su reducción de cargas de fatiga.

### 4.1. SISTEMAS DE CONTROL PASIVOS

#### 4.1.1. *Vortex Generators*

Un *Vortex Generator* (VG) es un sistema de control de flujo pasivo cuyo principal objetivo es retrasar el desprendimiento de la capa límite y aumentar el coeficiente de sustentación máximo  $C_{L_{\max}}$ . Los VGs consisten estructuralmente en unas simples plaquitas, generalmente de forma rectangular o triangular, instaladas lo más cerca posible del borde de ataque, y de una altura similar al espesor de la capa límite.

Con la implantación de VGs, se produce una transferencia de energía del fluido exterior (mayor velocidad) a la región de la capa límite, consiguiendo de esta forma su objetivo principal: retrasar el desprendimiento de la capa límite.

Los VGs son posicionados generalmente de forma oblicua y en parejas a lo ancho del perfil (*spanwise*) proporcionando de esta forma un ángulo de ataque ( $\alpha$ ) respecto al flujo de aire local. Dentro del trabajo de Fernández-Gámiz [4] se aprecia la disposición de una pareja de VGs sobre una placa plana y el comportamiento de las líneas de corriente generadas por los mismos. (Ver Figura 3).

Para estudiar el impacto de los VGs en perfiles aerodinámicos, su óptima colocación y distribución se emplean herramientas computacionales fluido-dinámicas (CFD), lo cual puede conllevar mayores tiempos de proceso y problemas computacionales. Por este motivo se han buscado modelos simplificados, como el modelo BAY, desarrollado por Bender et al. [5].

En el estudio realizado por Fernández-Gámiz et al. [6], se realizó una comparación detallada de un VG sobre una placa plana con 4 diferentes modelos. Un primer modelo basado en el método tradicional mallando el VG, un segundo modelo a partir de la teoría de Bender et al. mencionada anteriormente, un tercer modelo experimental (Velte et al. [7]) basado en datos experimentales en túnel de viento y un cuarto modelo analítico. En la misma línea, Zamorano G. et al [8] analizaron la evolución de la estela aguas abajo de un generador de vórtices rectangular a diferentes ángulos de incidencia. Fernández-Gámiz et al. [9] también compararon las simulaciones CFD con las observaciones experimentales y analizaron cómo pueden las simulaciones reproducir las características físicas del flujo.

Estos dispositivos presentan una serie de ventajas importantes, tales como su pequeño tamaño, lo cual permite colocar un gran número de ellos a lo largo del perfil, la facilidad de reemplazarlos sin gran coste y la posibilidad de añadirlos una vez construido el perfil aerodinámico. Por otra parte, el principal inconveniente es el aumento del coeficiente de arrastre ( $C_D$ ) que conlleva la implantación de este dispositivo, una característica no deseada.

#### 4.1.2. Microtabs

Las *microtabs* consisten en una pequeña lengüeta que emerge del ala aproximadamente perpendicular a su superficie en las inmediaciones de la cola del perfil. Una serie de estas *microtabs* dispuestas a lo ancho del perfil generan un cambio en



Fig. 5: Pala de una turbina eólica con el dispositivo Serrated trailing edge

la sustentación al desplazar el punto de separación del flujo. El aumento de sustentación se consigue desplegando las lengüetas en la superficie de presión (inferior) y el decrecimiento de sustentación es conseguido desplegando las lengüetas en la superficie de succión (superior). (Ver Fig. 4). Su altura suele ser del orden del espesor de la capa límite (1%-2% de la cuerda del perfil).

Van Dam [11] ha realizado numerosos estudios al respecto, incluyendo análisis computacionales fluido-dinámicos (CFD) y pruebas en túnel de viento, determinando su óptima configuración y comprobando el desempeño de este sistema.

Presentan algunas ventajas interesantes para su aplicación en turbinas eólicas:

1. Pequeño tamaño.
2. Poca energía necesaria para su activación y uso.
3. Pueden ser fabricados en gran número (bajo coste).
4. Pueden ser implementados sin grandes cambios con las técnicas actuales empleadas para la fabricación de los perfiles aerodinámicos.

#### 4.1.3. Serrated Trailing Edge

Originalmente, en las superficies aerodinámicas de las palas de una turbina eólica convergen los flujos de la zona de presión y de la zona de succión, lo cual es una fuente de ruido aerodinámico, pérdida de

sustentación y aumento del coeficiente de arrastre; efectos negativos que reducen la eficiencia del sistema.

Como alternativa para solucionar esta problemática, Siemens [12] patentó un dispositivo consistente en una placa con forma de dientes de sierra que es colocada a lo largo de la pala, comenzando desde el borde de ataque. (Ver Fig. 5).

Al ser un añadido al perfil aerodinámico, presenta la ventaja de poder crear una geometría del dispositivo personalizada para cada perfil, según las condiciones de funcionamiento en las que se encuentre.

#### 4.1.4. Fences

En las palas de las turbinas eólicas también se propagan flujos de aire a través de la longitud transversal de la pala. Dichos flujos disminuyen el rendimiento de la pala, particularmente porque contribuyen a la separación del flujo principal de aire de la superficie de la pala, y por tanto afectando negativamente a la sustentación.

Una "fence" consiste en una pequeña placa en el sentido de la cuerda de la pala que actúa como obstáculo para la propagación de estos flujos transversales [13]. El grado en que la fence es capaz de prevenir estos flujos es directamente proporcional a la altura de la misma. Sin embargo, a mayor altura mayor es el peso, además de afectar a otras características

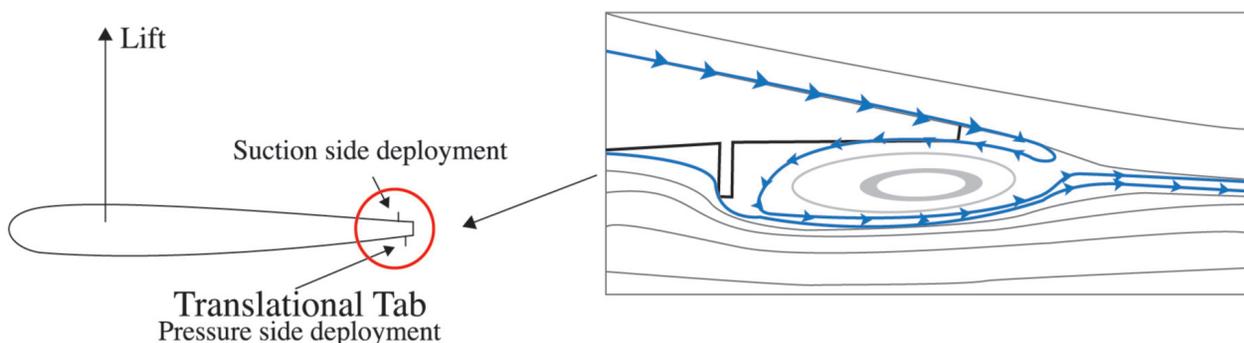


Fig. 4: Concepto de micro tab y líneas de corriente producidas en el borde de salida con el micro tab desplegado en la superficie inferior (Chow and Van Dam) [10]

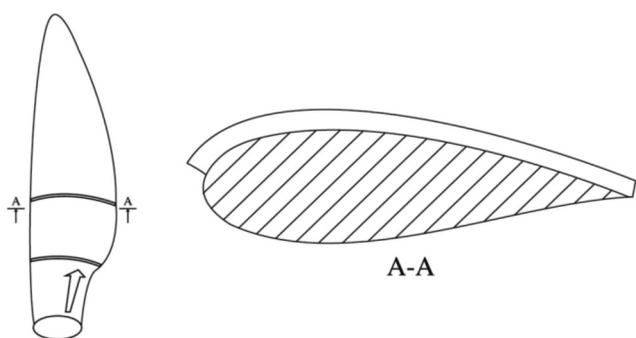


Fig. 6: Pala de una turbina eólica con una fence instalada e imagen de su sección A-A [13]

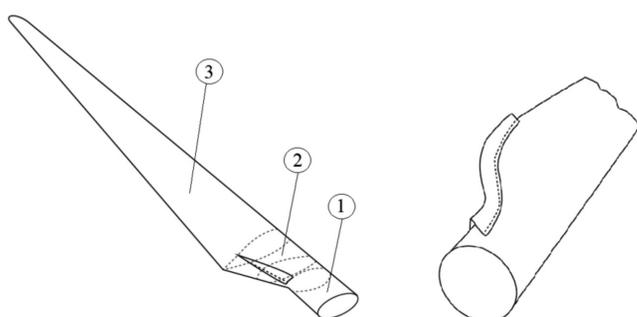


Fig. 7: Pala de una turbina eólica con un dispositivo "spoiler" [15]

aerodinámicas de la pala, como la sustentación.

Chow et al [14] realizaron un estudio de la altura de una *fence* con una pala NREL 5-MW de 63 metros de largo. En él se observó que la altura óptima en la posición de cuerda máxima, situada a 13,7m de la base de la pala, parece ser la correspondiente al 2.0% de la  $C_{max}$ , donde el incremento de potencia es 0.67% y el del empuje del 0.34%. En cuanto a la posición se concluyó que la efectividad de la *fence* claramente disminuye a medida que la alejamos de la posición de cuerda máxima.

#### 4.1.5. Spoilers

Con el paso del tiempo, la construcción de palas ha evolucionado a una forma consistente en una región de raíz con sección circular, más cerca del eje,

una región con un perfil aerodinámico que genera la sustentación necesaria para generar energía, y la región de transición entre estas dos partes. La sección de raíz no contribuye a la producción de energía, incluso la disminuye un poco por el arrastre. Como se intuye por su nombre, la región de transición tiene una forma gradualmente cambiante desde la sección circular hasta el perfil aerodinámico, incrementando su anchura linealmente.

Estas secciones de las turbinas eólicas suelen operar en situaciones de

pérdidas, especialmente con altas velocidades de viento. Por eso son convenientes unos mecanismos, como los "spoilers" [15], para incrementar la sustentación en estas condiciones (y no para frenar) y para conseguir aumentar la potencia generada por la turbina.

Este dispositivo presenta un inconveniente principal para su aplicación en turbinas eólicas frente a la aeronáutica: el hecho de que las palas deben trabajar con unos ángulos de incidencia mucho más amplios.

## 4.2. SISTEMAS DE CONTROL ACTIVOS

### 4.2.1. Traditional Trailing-Edge Flaps

Su concepto se basa en el incremento (despliegue en la zona de presión) o decrecimiento (despliegue en la zona de

succión) de la curva del perfil aerodinámico. Los *Trailing edge flaps* generan un cambio sustancial en el coeficiente de sustentación del perfil.

Pueden ser empleados de dos maneras:

1. *Discrete flaps*: Se aplica energía externa en forma de momento para conseguir la posición requerida.
2. *Flexible flaps*: Su forma más suavizada entre el dispositivo y el perfil aerodinámico incrementa su eficacia.

Pese a ser una tecnología bastante empleada y desarrollada en el sector aeronáutico, con buenos resultados, su aplicación en turbinas eólicas presenta algunos inconvenientes, como son el tamaño y el peso que puede alcanzar el dispositivo, los actuadores mecánicos para desplegarlo y el ruido aeroacústico que conllevan.

### 4.2.2. Air Jet Vortex Generators

Los *Air Jet Vortex Generators* fueron inicialmente propuestos por Wallis et al. [16]. Consisten en emplear chorros circulares de aire sobre una superficie (perfil aerodinámico) para producir una velocidad persistente con el objetivo de retrasar la separación de la capa límite.

Se observó que introduciendo este chorro de aire (con una cierta inclinación y cabeceo) a la corriente de aire natural que recorre la superficie, se producían vórtices en el sentido de la corriente. Estos vórtices permanecen dentro de la capa límite del perfil atrayendo aire exterior, produciendo así una transferencia de energía que consigue retrasar el desprendimiento de la capa límite, incrementando el coeficiente de sustentación máximo  $C_{L_{máx}}$  y el ángulo de ataque de entrada en pérdida ( $\alpha_{stall}$ ).

En cuanto a su aplicación en turbinas eólicas, este dispositivo presenta muchas características que lo hacen interesante. Una de las más importantes es el amplio margen de control sobre el dispositivo, lo cual permite modificar los parámetros de generación de vórtices según sean las necesidades. Sin embargo este dispositivo también presenta inconvenientes, como el requerimiento de líneas de aire comprimido.

### 4.2.3. Synthetic Jets

Este tipo de dispositivo de control del flujo activo genera vórtices en el sentido de la corriente similares a los genera-

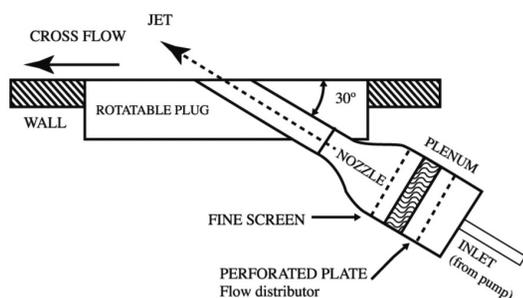
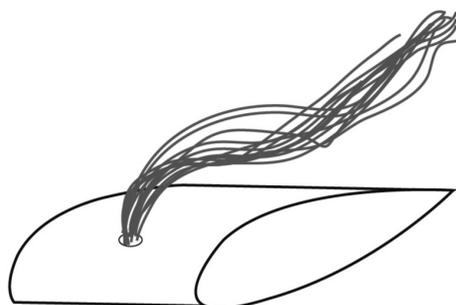


Fig. 8. Sistema de Air Jet Vortex Generators



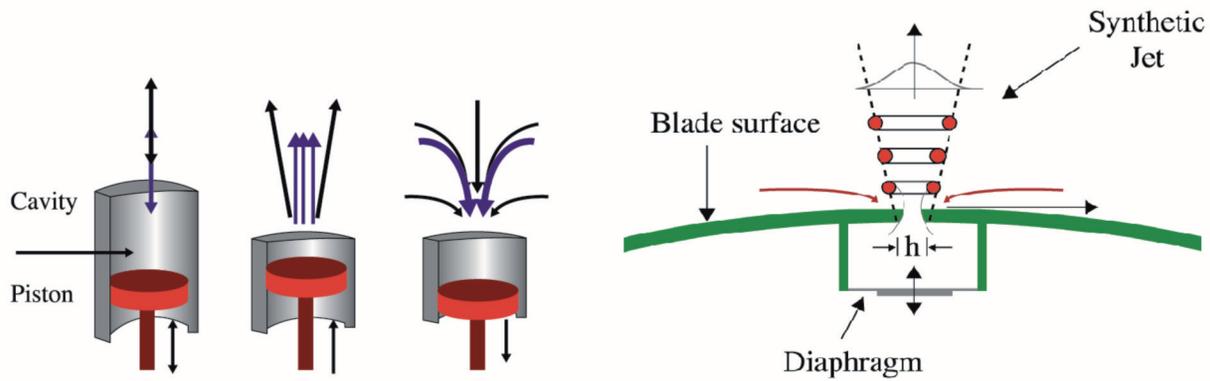


Fig. 9. Esquema de funcionamiento de los Synthetic Jets

dos por los *Pulsed Vortex Generator Jets* (PVJG). La diferencia principal es que es un dispositivo con un flujo neto de masa nulo, es decir, el vórtice es generado por la alternancia de eyección y succión de fluido a través de un orificio es creado por completo con aire que está siendo controlado, por lo que no son necesarias conducciones de aire.

Los chorros son comúnmente generados mediante el uso de un diafragma oscilante que se encuentra incrustado en una cavidad con la superficie aerodinámica. Estos dispositivos se encuentran localizados en un 10%-20% de la cuerda del perfil aerodinámico y pueden ser instalados en cualquier ángulo respecto a la superficie aerodinámica.

Su aplicación en turbinas eólicas presenta a priori ventajas como su localización (10%-20% de la cuerda del perfil) que facilitaría su instalación y la poca energía externa necesaria para su activación. Por otro lado la presencia de cavidades puede generar ruido y disminución de rendimiento cuando el dispositivo está inactivo.

## 5. CONCLUSIONES

El sector eólico está creciendo con gran rapidez y muestra signos de que seguirá siendo así en los siguientes años. El crecimiento de esta industria supone un incremento en el tamaño de las turbinas eólicas, lo cual conlleva un aumento en las cargas que tiene que soportar el sistema. Esto también puede provocar mayores costes de mantenimiento y operación para mantener el ciclo de vida de la estructura.

Los dispositivos activos y pasivos del control de flujo se presentan como una solución a estos problemas. Son de un tamaño discreto, de peso ligero y pueden contrarrestar las cargas por los vientos turbulentos. Las mejoras de estos dispositivos pueden mejorar el ciclo de vida

de las turbinas eólicas, la producción de energía, el rendimiento del sistema y reducir el COE (Coste de la energía).

## PARA SABER MÁS

- [1] Wood R.M. "A Discussion of Aerodynamic Control Effectors (ACEs) for Unmanned Air Vehicles (UAVs)" In: *AIAA's 1st Technical Conference and Workshop on Unmanned Aerospace Vehicle Systems, Technologies and Operations*. Portsmouth Virginia 20-23, May 2002. P. 2002-3495. DOI: <http://dx.doi.org/10.2514/6.2002-3494>
- [2] Corten G.P. "Vortex Blades". In *Proceedings of WindPower Conference*. Los Angeles, United States. June 4, 2007.
- [3] Van Dam C.P, Berg D.E, Johnson S.J. "Active Load Control Techniques for Wind Turbines". August 2008. United States. DOI: <http://dx.doi.org/10.2172/943932>
- [4] Fernández-Gámiz U. "Fluid Dynamic Characterization of Vortex Generators and Two-dimensional Turbulent Wakes". Director: Egusquiza E. Universidad Politécnica de Catalunya, Departamento de Mecánica de Fluidos, 2013.
- [5] Bender E.E, Anderson B.H, Yagle P.J. "Vortex Generator Modeling for Navier-Stokes Codes," American Soc. of Mechanical Engineers Paper FEDSM99-6929, New York, July 1999.
- [6] Fernández-Gámiz U, Réthoré P.E, Sørensen N.N, et al. "Comparison of four different models of vortex generators". In: *Proceedings of EWEA 2012 - European Wind Energy Conference & Exhibition*. European Wind Energy Association (EWEA).
- [7] Velte C.M, Okulov V, Hansen M.O.L. "Alteration of helical vortex core without change in flow topology" In: *Physics of Fluids*, 2011, Vol. 23, No. 5, p. 051707. DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.3592800>
- [8] Zamorano-Rey G, Garro B, Fernandez-Gamiz U, et al. (2015). "A computational study of the variation of the incidence angle in a vortex generator". *DYNA New Technologies*. Vol. 2 p.1-13. DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/NT7357>
- [9] Fernández-Gámiz U, Velte C.M, Réthoré P.E, et al. Testing of self-similarity and helical symmetry in vortex generator flow simulations. In: *Wind Energy*. John Wiley & Sons, Vol.18, United States, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/we.1882>
- [10] Chow R, Van Dam, C.P. "Unsteady Computational Investigations of Deploying Load Control Microtabs". *Journal of Aircraft*, Sept-Oct 2006, Vol. 43, No. 5, p.1458-1469. DOI: <http://dx.doi.org/10.2514/1.22562>
- [11] Yen, D.T., Van Dam C.P., Bräuchle, F, et al. "Active Load Control and Lift Enhancement Using MEM Translational Tabs," In: *Proceedings of the Fluids Conference and Exhibit*, AIAA Paper 2000-2422. June 2000. United States. DOI: 10.2514/6.2000-2242
- [12] Stiesdal H, Enevoldsen P.B. *Flexible serrated trailing edge for wind turbine rotor blade*. Siemens. European Patent Office, EP 1 314 885 B1. 2003-05-28.
- [13] Quell P, Petsche M. *Rotor blade for a wind power station*. United States Patent No. 7,585,157 B2. 2009-11-08.
- [14] Chow R, Van Dam C.P. "Inboard Stall and Separation Mitigation Techniques on Wind Turbine Rotors". In: *49th AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition*. United States, 2011. DOI: <http://dx.doi.org/10.2514/6.2011-152>
- [15] Lenz K, Fuglsang P. *Wind turbine having a spoiler with effective separation of airflow*. European Patent Office, EP 2 141 358 A1. 2008-12-12.
- [16] Wallis R. A. "A preliminary Note on a Modified Type of Air Jet for Boundary Layer Control". Aeronautical Research Council, Australia, Current Paper CP 513, 1960.

## AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al Dr. Unai Fernández Gámiz, del Departamento de Ingeniería Nuclear y Mecánica de Fluidos de la Universidad del País Vasco de Vitoria-Gasteiz, por su disponibilidad para compartir bibliografía, tiempo y conocimiento sobre todo el área que comprende esta publicación. Este trabajo ha sido respaldado por el Gobierno Vasco y la Universidad del País Vasco UPV-EHU a través de SAIOITEK (S-PE11UN112) y los programas de investigación EHU12/26, respectivamente. Se agradece también el apoyo humano y técnico recibido por IZO-SGI, SGIker (UPV-EHU, MICINN, GV/EJ, ERDF and ESF).