

# Análisis sobre el empleo de materiales inteligentes para el aumento de la vida a fatiga en palas de aerogeneradores



**Óscar López García**

Profesor del Departamento de Fluidos y Calor ETSI-ICAI. Sus campos de conocimiento son mecánica del medio continuo, energía eólica, materiales inteligentes y el método de elementos finitos.



**Irene Orte Tejedor**

Ingeniero industrial del ICAI (2004). Proyecto fin de carrera sobre los materiales inteligentes en las palas de aerogeneradores. ETSI-ICAI. Universidad Pontificia Comillas de Madrid, 2004.

En este artículo se evalúa el empleo de materiales inteligentes o activos para que mediante las deformaciones inducidas producidas por un sistema de alimentación y control se aumente la vida a fatiga de un componente estructural a través de la disminución de las cargas a las que se ve sometido. En concreto, el principio de funcionamiento se aplica a una pala de aerogenerador para determinar cómo la vida a fatiga de la pala aumenta con la actuación de los materiales inteligentes distribuidos sobre la pala. Se ha analizado la respuesta estructural de la pala activa bajo el efecto de la cortadura del viento y se ha estudiado la influencia de la actuación en la vida a fatiga y la variación de peso de la pala por el uso de los materiales inteligentes.

## Introducción

El objetivo de este artículo es mostrar cómo el uso de materiales inteligentes puede conseguir disminuir las cargas a fatiga de estructuras en general, y en particular la de una pala de aerogenerador. Se han omitido los aspectos más matemáticos y de modelado de detalle con los que se han obtenido los resultados presentados. En el proyecto final de carrera [5] se puede encontrar la formulación completa y detallada.

El artículo se organiza como sigue: primero se introducen los principios básicos desarrollados por la comunidad científica para

controlar las vibraciones de una estructura empleando materiales inteligentes, en particular algunos de los avances más significativos en el campo del control aeroelástico y de vibraciones de alas rotantes. A continuación se describen las principales cargas estructurales que debe soportar una pala de aerogenerador y su importancia en la determinación de la vida a fatiga. Después se presenta la aplicación de los principios de control activo mediante material distribuido a una pala de aerogenerador y se describe el proceso de cálculo seguido. Finalmente, se discuten los resultados obtenidos.

## Control de vibraciones mediante estructuras inteligentes

El control de vibraciones permite que estructuras sometidas a acciones exteriores de naturaleza aleatoria, como vientos, olas o terremotos, puedan ampliar sus límites de operación; aumenten la duración de su vida operativa, mejoren la seguridad de su funcionamiento; incrementen la sensación de confort y la calidad de su funcionamiento, disminuyan el coste del producto final, o incluso simplifiquen el sistema mediante la eliminación de elementos auxiliares, lo cual conlleva un aumento de la fiabilidad del sistema global al que pertenecen. El lector interesado puede encontrar más información sobre el control de vibraciones en [6].

Una clasificación inicial del tipo de control de vibraciones que se puede desarrollar atiende a la forma de realizar el control:

- **Control pasivo** es el control clásico de vibraciones en el cual el sistema de control para funcionar no requiere ningún aporte energético exterior. Se suele modificar la rigidez o el amortiguamiento para reducir, por ejemplo, el pico de resonancia. Con este tipo de control el comportamiento dinámico de la estructura se modifica una vez y para siempre. La actuación de este control se caracteriza por un ancho de banda estrecho y su efectividad está directamente relacionada con la entrada que se espera por lo que la capacidad de control que se consigue es limitada.

- **Control activo** es el control que corresponde a una estructura en la que se usa un conjunto de actuadores y sensores de forma que interactúan entre sí empleando técnicas de realimentación para conseguir el control de vibraciones. El control activo se suele emplear junto con la realimentación para conseguir el amortiguamiento activo de las vibraciones de una estructura de forma que se reducen los picos de resonancia de la función de transferencia en lazo cerrado modificando en general su comportamiento dinámico. El mayor inconveniente que presentan es el alto aporte energético exterior que requieren.

- **Control semiactivo** es un sistema pasivo en el cual las propiedades, por ejemplo rigidez o amortiguamiento, son modificadas en tiempo real con un bajo aporte energético exterior. Aunque se comportan de una forma altamente no lineal, su naturaleza es pasiva y a diferencia de los sistemas activos no pueden desestabilizar el sistema. También son menos vulnerables a fallos del sistema de alimentación.

El control de vibraciones se puede realizar mediante el empleo de materiales inteligentes que permitan la aparición de deformaciones inducidas por la aplicación de un campo externo, magnético, térmico o eléctrico. Existen diversas técnicas empleadas en el control de vibraciones mediante actuadores de deformación inducida en el campo de las alas rotantes. En la referencia [3] se puede encontrar una amplia revisión de las soluciones propuestas para el control aeroelástico y

Fira Barcelona

14.11.05  
18.11.05

Gran Via M2  
www.eurosurf.com  
902 233 200



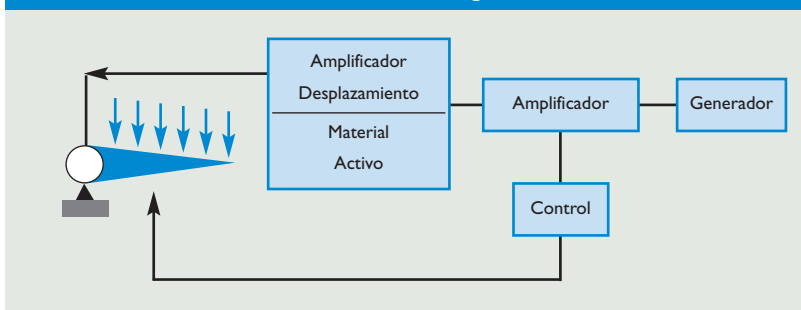
# EUROSURFAS

Salón Internacional de la Pintura  
y el Tratamiento de Superficies

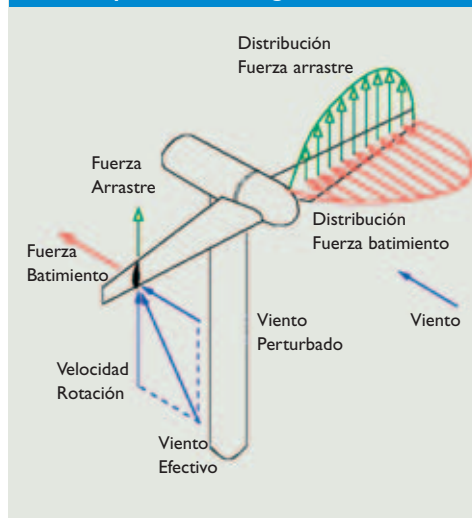
- La representación más completa del mundo de las superficies está en EUROSURFAS.
- El mayor encuentro de la química aplicada del mediterráneo.
- Un salón con personalidad propia que aglutina y marca tendencias.
- Diseñado para albergar toda la oferta y demanda en un enclave único: más espacio para usted.
- La más variada oferta de recubrimientos orgánicos e inorgánicos.
- En EUROSURFAS el éxito sale a la superficie.



**Figura 1. Actuador de deformación inducida para el control de vibraciones en un aerogenerador**



**Figura 2. Cargas estructurales sobre la pala de un aerogenerador**



de vibraciones en alas fijas o rotantes. Todas ellas se pueden clasificar en dos grandes grupos:

- **Materiales activos distribuidos.** Consiste en crear en la estructura una distribución más o menos continua de la deformación inducida por los materiales activos.
- **Actuadores localizados.** En este tipo de diseño se suelen emplear materiales inteligentes formando un mecanismo de actuación en sí mismo.

### Materiales activos distribuidos

Normalmente se suelen embeber materiales inteligentes en forma de láminas entre las fibras y la matriz del material compuesto del que suele estar formada la estructura. Cabe mencionar que dentro de este tipo de sistemas se han diseñado materiales compuestos que acoplan movimientos de flexión con giros de torsión para conseguir controlar las vibraciones de la estructura.

La distribución de materiales activos a lo largo de la estructura aporta evidentes ventaj

as, en particular produce una suave variación de la deformación inducida. El hecho de que los materiales activos puedan ser también embebidos en la estructura aporta importantes ventajas especialmente desde el punto de vista aerodinámico. Existen diversas técnicas para llevar a cabo el control activo de estructuras aerodinámicas, en concreto para el caso de palas de helicópteros cabe destacar:

- **Giro de torsión inducido.** Sobre la superficie de la pala se adhiere una placa piezoeléctrica y la activación de esta placa induce un giro de torsión sobre la superficie que es empleado para controlar las vibraciones de la pala.
- **Materiales compuestos de fibra activa.** Estos materiales compuestos consisten en estructuras laminadas formadas por unas láminas de fibra de vidrio y otras piezoeléctricas embebidas en una capa epoxy con películas de electrodos de cobre y poliamida. La activación de estos materiales compuestos induce una deformación de cortadura que genera un giro de torsión de la pala reduciendo las vibraciones en ésta.

- **Punta de pala activa por acoplamiento torsión-flexión.** Consiste en segmentos situados a lo largo de la envergadura de la pala formados por capas estructurales y piezoeléctricas orientados diagonalmente. A los segmentos se les proporciona energía de forma que se cancela la deformación inducida por curvatura de flexión y se superponen la deformación inducida por curvatura de torsión consiguiendo una rotación neta de la punta de pala.

### Actuadores de deformación inducida

El uso de actuadores de deformación inducida de estado sólido ha experimentado una gran expansión en los últimos años. Inicialmente se desarrollaron para aplicaciones acústicas de pequeños desplazamientos y alta frecuencia, estos conceptos revolucionarios están actualmente desarrollándose en diferentes campos de aplicación, como por ejemplo en áreas de diseño mecánico y espacial. Compactos y fiables, los actuadores de deformación inducida transforman directamente la energía eléctrica o magnética entrante en energía mecánica.

Se han diseñado actuadores específicos basados en materiales inteligentes como piezoeléctricos, aleaciones de memoria de forma o magnetostrictivos. De esta forma se ha conseguido simplificar los sistemas hidráulicos que alimentan los servo-mecanismos

que actúan sobre las superficies de control de alas de avión o palas de helicópteros.

En la Figura 1 se muestra el esquema más habitual en el uso de actuadores de deformación inducida y su posible implementación en un aerogenerador:

### Cargas estructurales sobre la pala de un aerogenerador

El rotor de un aerogenerador se encuentra sometido a la acción directa del viento. Desde el punto de vista estructural esto implica que existe una interacción entre la estructura y el viento; de manera que éste deforma las palas del rotor y la respuesta dinámica de las palas modifica el flujo del viento. Esta interacción aeroelástica se hace especialmente crítica cuando el diseño de las palas tiende a ser muy flexible. Debido a la naturaleza de su funcionamiento además hay que considerar que las palas del rotor se encuentran la mayor parte del tiempo en rotación, por lo que se deben tener en consideración efectos centrífugos, como por ejemplo la rigidez centrífuga o giroscópicos en maniobras de orientación.

En la Figura 2 se muestran las cargas estructurales más típicas que pueden aparecer en la pala de un aerogenerador: El viento aguas arriba del plano del rotor llega sin perturbar y conforme se acerca al plano del rotor sufre una deceleración por la presencia del rotor y la torre. La pala de un aerogenerador está formada por secciones que poseen una forma aerodinámica y que se denominan perfiles aerodinámicos. Las fuerzas aerodinámicas que aparecen sobre la pala del aerogenerador dependen de la velocidad relativa en cada perfil. La velocidad relativa que ve cada sección está formada por la velocidad de rotación y la velocidad de la corriente perturbada por la presencia del rotor y de la torre. Las fuerzas aerodinámicas que aparecen sobre cada sección se pueden descomponer en dos contribuciones principales:

- Fuerza de arrastre (fuerza en el plano de rotación) Esta fuerza es la responsable de la producción del par motor que mueve las palas y transforma la energía cinética del viento en otro tipo de energía, habitualmente eléctrica.
- Fuerza de batimiento (fuerza fuera del plano de rotación) Esta fuerza debe ser soportada por la pala y el resto de la estructura para garantizar la correcta operación del aerogenerador y en casos extremos (huracanes, ráfagas, etc.) la supervivencia del aerogenerador.

Ambas fuerzas se distribuyen a lo largo de la envergadura de la pala produciendo momentos flectores de arrastre y batimiento que deben ser soportados por la estructura del encastre de la pala al buje. Desde el punto de vista estructural la contribución del momento flector debido a la fuerza de batimiento es el más importante de los dos y el que normalmente determina la vida a fatiga de la pala.








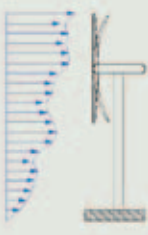
En el cálculo estructural de los componentes de un aerogenerador se deben contemplar diversos casos de carga. Estos casos de carga se contemplan en diferentes normas, por ejemplo [1]. Básicamente, existen casos de carga correspondientes a situaciones de funcionamiento normal y casos extremos. Desde el punto de vista de las cargas que debe soportar el aerogenerador, la variabilidad tanto espacial como temporal del viento es la mayor fuente de cargas variables y determina la vida de sus componentes. Existen otras contribuciones al daño por fatiga como pueden ser ráfagas, arranques y paradas de la máquina, desalineaciones, variación de la velocidad relativa a la pala en su paso por la torre (sombra de torre), etc.

En la Tabla 1 se muestran algunas de las cargas más típicas consideradas en el cálculo estructural de componentes de aerogenerador. Dependiendo de su naturaleza se distinguen las de origen aerodinámico (AD) y las inerciales (IN). En función de su variación temporal se pueden diferenciar entre estáticas y dinámicas. Dependiendo de su variación temporal las cargas dinámicas se dividen en cíclicas y estocásticas, éstas últimas son las que aparecen como consecuencia de la turbulencia atmosférica. Las cargas estructurales que más influyen en la vida a fatiga de una pala son las debidas a la cortadura, sombra de torre, desalineaciones y especialmente críticas son las asociadas a la turbulencia atmosférica. En los resultados que más adelante se mostrarán sólo se ha considerado la contribución a la vida a fatiga de la carga debida a la cortadura atmosférica. En [2] se puede encontrar información más detallada sobre el cálculo estructural de aerogeneradores.

### Aplicación a la pala de un aerogenerador

Las palas de aerogeneradores se construyen mediante materiales compuestos formados por fibras de vidrio o carbono embebidas en matrices de resina epoxy o poliéster:

Tabla 1. Casos de cargas típicas a considerar en el cálculo estructural de la pala de un aerogenerador

Estáticas		Dinámicas					
		Cíclicas					Estocástica
Uniforme AD	Centrífuga IN	Cortadura AD	Sombra AD	Desalineación AD	Peso IN	Giroscópica IN	Turbulencia AD
							

Existen diversas combinaciones pero las más empleadas son: GFRP (fibra de vidrio reforzada con resina poliéster), GFRE (fibra de vidrio reforzada con resina epoxy) y CFRE (fibra de carbono reforzada con resina poliéster).

Estos materiales compuestos presentan buenas propiedades estructurales, gran resistencia específica, elevada vida a fatiga y alta rigidez. Presentan mejores propiedades a fatiga y una mayor resistencia específica que los aceros por lo que son más empleados en la fabricación de palas de aerogeneradores. Los materiales compuestos basados en fibras de vidrio presentan peores propiedades estructurales que los basados en fibras de carbono pero su coste, un orden de magnitud inferior, hace que sean los más empleados. El diseño de estructuras inteligentes basadas en materiales distribuidos se adapta perfectamente a este tipo de construcción de palas.

Dependiendo del tipo de material activo la deformación inducida es sensible a diferentes estímulos exteriores. En este estudio se han considerado dos tipos de materiales activos:

- PZT (*Zirconato Titanato de Plomo Material*) Cerámico ferroeléctrico con propiedades piezoeléctricas y comportamiento recíproco que convierte energía eléctrica en mecánica y viceversa. Dentro de este tipo de material cerámico cabe destacar el PZT-5H, que es uno de los más ampliamente usados en las aplicaciones de los actuadores. El comportamiento del material PZT es casi lineal, aunque presenta una leve histéresis. La relación que existe entre la deformación libre que experimenta el PZT-5H,  $\epsilon$ , y el campo eléctrico,  $E$ , es de la forma:  $\epsilon = d_{13} \cdot E$ , donde  $d_{13}$  es la constante de acoplamiento.

- TERFENOL (*TER, Terbio, FE, Hierro, NOL, Naval Ordnance Laboratory*) Aleación de terbio, disprosio y hierro que presenta carácter magnetostrictivo. Aunque varios tipos de TERFENOL han sido desarrollados, el uso comúnmente es el TERFENOL-D. La relación que existe entre la deformación libre que experimenta el TERFENOL,  $\epsilon$ , y el campo magnético,  $H$ , es cuadrática  $\epsilon = d_1 \cdot H^2 + d_2 \cdot H^4$ . Esta variación cuadrática hace que para una variación del campo se pueda obtener un incremento de la deformación libre mayor que con el PZT-5H.

En la Tabla 2 se listan algunas de las propiedades más representativas tanto del PZT-5H y el TERFENOL. Como se puede observar el material piezoeléctrico tiene como ventajas que su módulo elástico es mayor que el TERFENOL (aumentará el módulo de la base de la pala) y que su densidad es menor (menor peso). Por otro lado, el valor de las constantes que se muestra en la Tabla 2 es el utilizado para calcular la relación que existe entre la deformación libre que experimenta el material activo y el campo que se le está aplicando.

Para disminuir las cargas a fatiga de una pala se ha considerado el efecto de un recubrimiento exterior de material activo en la zona próxima al encastramiento. El efecto de este recubrimiento se traduce en la aparición de una rigidez variable con el tiempo que dependiendo de la forma con que se alimente exteriormente será capaz de controlar los desplazamientos de la pala reduciendo los esfuerzos en el encastramiento de ésta. Se ha analizado el comportamiento estructural del recubrimiento estructural empleando materiales activos diferentes como son los piezoeléctricos y los magnetostrictivos. En la Figura 3 se muestra el tipo de estructura

propuesta. El parámetro  $\beta$  mide la cantidad de sección circular recubierta de material activo. Un valor de  $\beta=0$  representa que toda la sección está cubierta con material activo y  $\beta=\pi/2$  indica que no hay material activo.

El cálculo estructural se ha resuelto empleando un modelo de elementos finitos basados en la teoría de vigas de Bernoulli implementada mediante un elemento finito convencional con grados de libertad en desplazamientos y rotación. Para modelar el comportamiento del material activo se ha empleado un acoplamiento débil, calculando la deformación inducida producida por la alimentación exterior del material activo pero sin considerar la variación de propiedades activas debidas al cambio en el campo de deformaciones. Esta aproximación es ampliamente usada en este tipo de análisis. La respuesta temporal debida al giro de la pala se ha obtenido empleando el método de Newmark.

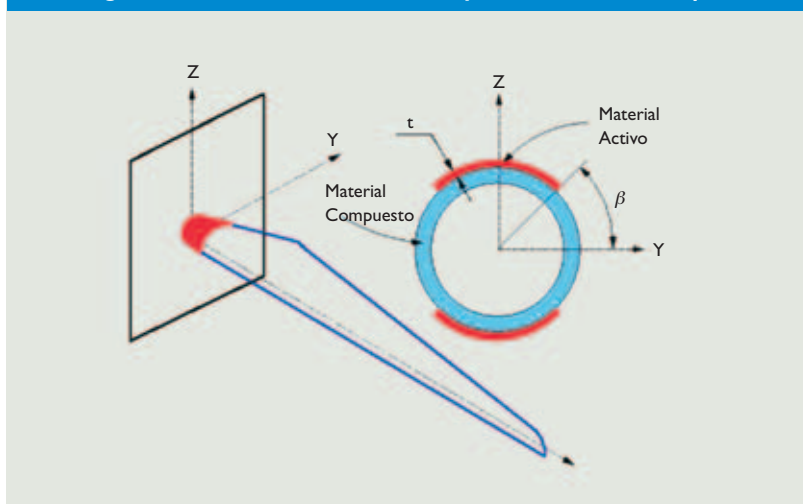
Desde el punto de vista aerodinámico se ha calculado la distribución de fuerzas aerodinámicas correspondiente al caso de coeficiente de potencia máximo ideal. Aunque esta situación no se produce en la operación real de la máquina las fuerzas derivadas de esta suposición serán mayores a las que aparecerán en una situación real, de esta manera los resultados obtenidos se encuentran en el lado de la seguridad. Las cargas debidas al viento sólo consideran el efecto de la cortadura atmosférica por lo que la excitación que se introduce en el material activo para mitigar las vibraciones de la pala sólo contempla una componente armónica en contra fase con la excitación cíclica correspondiente a la cortadura.

Desde el punto de vista estructural sólo se ha considerado la componente de batimiento por ser esta componente la más influyente en la vida a fatiga de la pala y ser este estudio un análisis conceptual. A partir de la solución en desplazamientos del modelo de elementos finitos se ha obtenido la evolución temporal del esfuerzo en el encastre de la pala. En función del valor medio del esfuerzo y su rango se ha calculado el valor de la vida a fatiga correspondiente a la aplicación del criterio de Palmgren-Miner empleando las propiedades a fatiga del material compuesto de la pala.

Los resultados se han obtenido para el caso de la máquina Tjæreborg (ELSAM). Este aerogenerador es una máquina tripala de 2 Mw de potencia nominal. Se trata de un prototipo construido en 1987 con fines de in-

Material	Módulo elástico (GPa)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Constantes
PZT-5H	62·1010	7500	$d_{13}=-274\cdot 10^{-12}(\text{m/V})$
TERFENOL	30·1010	9250	$d_1=3.379\cdot 10^{-13}(\text{m/A})^2$ $d_2=2.259\cdot 10^{-23}(\text{m/A})^4$

Figura 3. Detalle de la sección activa y su localización en la pala



vestigación y desarrollo dentro del programa de energía eólica del gobierno danés y del cual se dispone abundante información. La vida a fatiga calculada se ha comparado con la obtenida sin emplear material activo. Los resultados se presentan comparándolos con el caso de que no exista actuación activa sobre la pala, de esta manera se minimiza el efecto de las simplificaciones realizadas, ya que en ambos casos se emplean las mismas hipótesis.

Los resultados se presentan como relación porcentual respecto del caso de referencia del aerogenerador Tjæreborg. Fundamentalmente se ha analizado el impacto tecnológico del empleo de actuadores distribuidos en dos aspectos fundamentales: el aumento de vida a fatiga y el aumento de peso asociado al empleo de estos materiales.

Se ha estudiado la influencia de diversos parámetros en el aumento de vida a fatiga y de peso. En particular, se ha analizado el efecto de la variación del espesor y ángulo de posición del recubrimiento así como la variación del campo de excitación del material activo, eléctrico para el caso piezoeléctrico y magnético para el magnetostrictivo. En concreto, para el material magnetostrictivo, el campo magnético exterior aplicado consta de dos componentes: una constante y otra

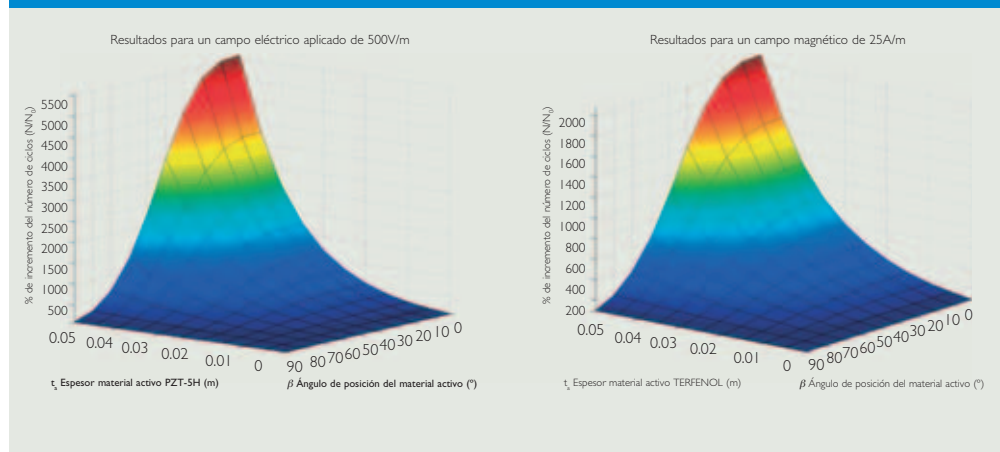
alternativa. La componente constante del campo magnético se ha introducido para producir un desplazamiento en la curva de comportamiento del material magnetostrictivo, está es una práctica habitual en los actuadores basados en este material para conseguir una mayor deformación inducida y suele tener unos valores muy concretos. La variable que se ha considerado es el valor del campo magnético alternativo superpuesto al campo constante.

En la Figura 4 se muestra el aumento en tanto por ciento del número de ciclos de vida a fatiga de la pala en función del espesor de material activo y del ángulo de recubrimiento ( $\beta$  según la Figura 3). Los resultados se han obtenido para un campo aplicado de amplitud constante. Para este caso la forma de las dos curvas es similar ya que la aplicación de este campo se traduce en un valor

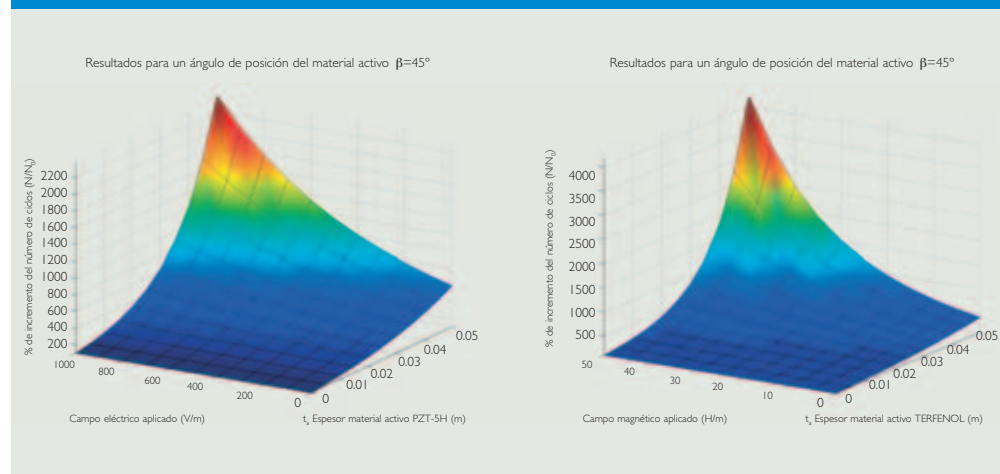
de deformación del material activo. Por lo tanto, al variar de igual forma la colocación del material activo sobre la pala se van a dar resultados análogos en el aumento del número de ciclos de vida a fatiga.

Observando ahora la Figura 5, en la que el parámetro que permanece constante es el ángulo de recubrimiento en  $45^\circ$ , se tiene que para el caso de tener un cierto espesor de material activo, si no hay ningún campo aplicado, con el PZT-5H el aumento del número de ciclos es mayor que con el TERFENOL debido a que el piezoelectrico posee un mayor módulo elástico. El aumento del número de ciclos por el hecho de colocar el material activo se debe a que se está aumentando la sección de la base y su momento de inercia, este hecho resulta interesante en cuanto a que se podría reducir la sección de la base de la pala y compensar

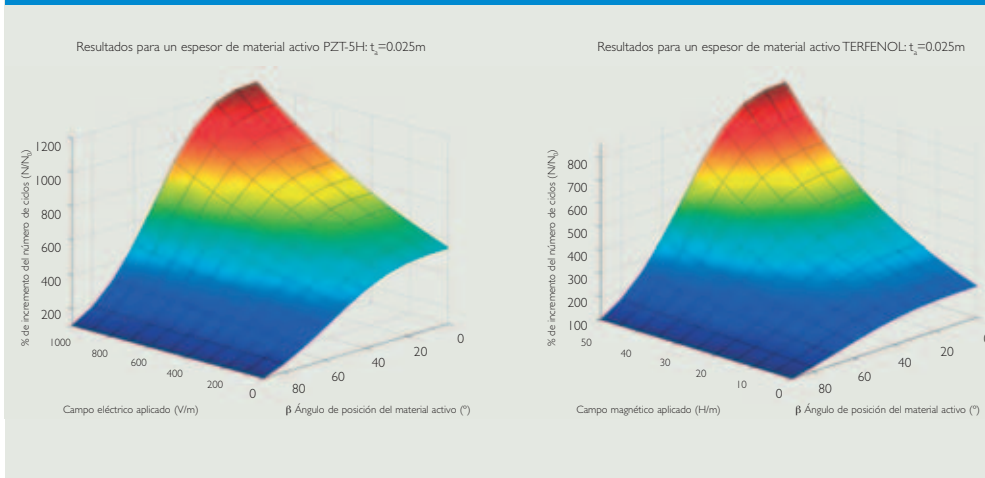
**Figura 4. Aumento de la vida a fatiga en función del espesor de material activo y del ángulo de recubrimiento para material piezoelectrico (izquierda) y magnetostrictivo (derecha)**



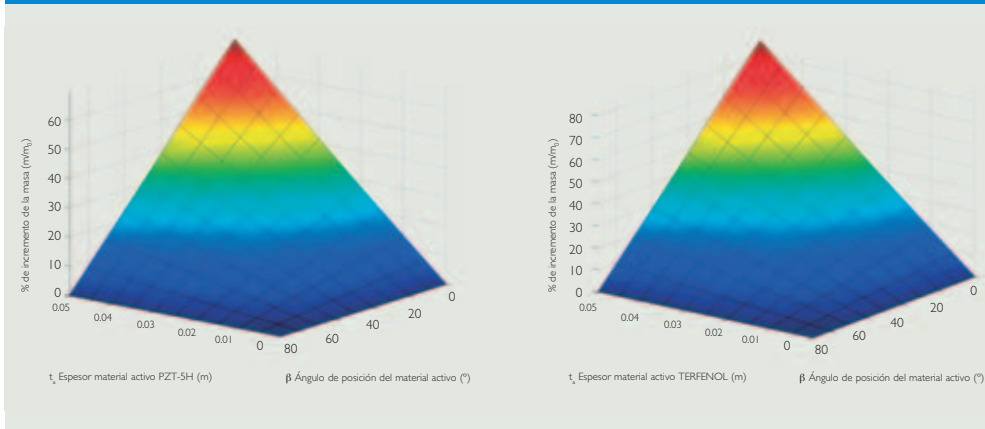
**Figura 5. Aumento de la vida a fatiga en función del espesor de material activo y del campo exterior para material piezoelectrico (izquierda) y magnetostrictivo (derecha)**



**Figura 6. Aumento de la vida a fatiga en función del campo exterior y del ángulo de recubrimiento para material piezoeléctrico (izquierda) y magnetostrictivo (derecha)**



**Figura 7. Aumento de la masa de la pala en función del campo exterior y del ángulo de recubrimiento para material piezoeléctrico (izquierda) y magnetostrictivo (derecha)**



esto con la colocación de material activo, produciéndose un aumento de la masa de la pala menor. La ventaja que cabe destacar del TERFENOL es que la deformación de éste está relacionada con el cuadrado del campo magnético y, por lo tanto, el aumento del número de ciclos a medida que aumenta el campo aplicado es mayor al que se produce con el PZT-5H.

En la Figura 6 el parámetro que no varía es el espesor del material activo ( $t_a = 0.025m$ ). Para un cierto valor del ángulo de recubrimiento y al igual que en la Figura 5, si no hay ningún campo aplicado, con el PZT-5H el aumento del número de ciclos es mayor que con el TERFENOL (el piezoeléctrico posee un mayor módulo elástico). Si el ángulo varía de los  $20^\circ$  a los  $0^\circ$  se consigue un aumento muy pequeño del número de ciclos en comparación con que se da al pasar de los  $50^\circ$  a los  $30^\circ$ ; esto es importante de destacar ya que la reducción del ángulo de recubrimiento

supone un aumento de la masa de material activo que se coloca.

Si se mira también la Figura 7 se tiene que con el piezoeléctrico se produce un menor incremento de la masa de la pala al colocar el material activo ya que posee una menor densidad. Una menor densidad implica un menor peso de la pala y por lo tanto, los esfuerzos producidos por el peso y el coste debido al incremento de volumen serán menores en el material piezoeléctrico.

Observando la Figura 7 junto con la 4 se puede observar que el aumento de masa que se da al reducir el ángulo de recubrimiento es lineal y, sin embargo, para valores inferiores a los  $20^\circ$  (Figura 4) no se obtienen casi mejoras en el número de ciclos. Es por esto que no resultará interesante recubrir totalmente la superficie y que ese ahorro de masa se puede invertir en aumentar el espesor del material activo, obteniéndose mejores resultados.



Estos resultados se han realizado colocando el material activo sobre las palas de la máquina Tjæreborg, pero si se implantase en una pala de nueva construcción se podría reducir la sección de ésta en la zona próxima al encastre ya que al colocar el material activo se aumenta la sección y el momento de inercia de esa zona. De esta forma se podría tener una base con similar sección y momento de inercia a los utilizados actualmente, pero que al estar formada también por un material activo pudiese tener una mayor vida a fatiga.

## Conclusiones

Teniendo en cuenta el carácter preliminar de los resultados obtenidos, consecuencia directa de las importantes simplificaciones realizadas, cabe decir que el empleo de recubrimientos activos en las palas de aerogeneradores es prometedor para disminuir las cargas de fatiga de estos componentes. Evidentemente, éste es un estudio conceptual que pretende poner de relieve el potencial que los materiales activos poseen para conseguir el aumentar la vida a fatiga de componentes estructurales con elevadas cargas de fatiga. A pesar de contemplar sólo el daño por fatiga asociado a la cortadura atmosférica es evidente que se pueden conseguir importantes aumentos de la vida a fatiga, entre 20 y 50 veces la vida sin material activo.

Desde el punto de vista de la realización práctica de un sistema de esta naturaleza existen muchas posibilidades que en este estudio no han sido analizadas. En concreto, no se ha evaluado ni diseñado la forma más eficaz para transportar la energía de excitación a la parte activa. Este aspecto plantea importantes retos tecnológicos y la solución óptima está lejos todavía de haber sido encontrada. Inicialmente se podría pensar en un sistema de anillos rozantes para transportar la energía eléctrica o magnética desde un sistema fijo como puede ser la salida del generador eléctrico situado en la góndola hasta el sistema móvil constituido por la palas donde se encontraría el material activo. Otra posibilidad consistiría en diseñar el sistema activo para que no sólo se disminuyeran las cargas a fatiga sino que permitiera controlar la potencia del aerogenerador mediante el acoplamiento activo entre los desplazamientos de batimiento y arrastre con las deformaciones inducidas de torsión. En el caso de máquinas de control de potencia por entrada en pérdida se dis-

pondría de un sistema que ayudaría de forma activa a aliviar las cargas y mejorar el control de la potencia. En el caso de aerogeneradores con control de potencia mediante cambio de paso se podría eliminar todo el sistema hidráulico y de actuadores que producen el cambio de paso de las palas simplificando el buje y aumentando la fiabilidad y disponibilidad de máquina.

En cuanto al análisis estructural es evidente la necesidad de llevar a cabo una especificación más detallada sobre la forma de integrar el material activo en la estructura. Especialmente importante resulta este aspecto en el caso de pretender acoplar la deformación inducida a flexión con la de torsión para poder controlar de forma activa la potencia que genera el aerogenerador.

Otro punto conflictivo y que merece un análisis más profundo es el del control de los desplazamientos de la pala sometida a excitaciones aerodinámicas debidas a la turbulencia atmosférica. No es evidente la estrategia del control de alimentación de la excitación del material activo para mitigar las vibraciones inducidas por la turbulencia. Para conseguir un control óptimo en estas condiciones se requiere un estudio del control de un sistema dinámico sometido a cargas aleatorias y el empleo de distintas técnicas de control basadas principalmente en el control predictivo. En la referencia [4] se considera un campo de velocidades de viento más complejo que en este estudio pero sin considerar tampoco la turbulencia. En cambio este trabajo aporta como novedad respecto [4] la cuantificación del aumento de vida a fatiga y de peso de la pala. ■

## Referencias

- [1] *Part 1: Safety requirements. Wind Turbine Generator Systems.* IEC 61400-1, 1999.
- [2] Tony Burton, David Sharpe, Nick Jenkins, and Ervin Bossanyi. *Wind energy: handbook.* John Wiley and Sons Chichester, 2001.
- [3] Victor Giurgiutiu. *Review of smart-materials actuation solutions for aeroelastic and vibration control.* Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 11: 525–544, July 2000.
- [4] Óscar López. *Blade stiffness active control.* Smart Blade Joule Project Report, 1997.
- [5] Irene Orte Tejedor. *Influencia de los materiales inteligentes en la vida a fatiga de palas de aerogeneradores.* Master's thesis, Escuela Técnica Superior de Ingeniería (ICAI), Universidad Pontificia Comillas de Madrid, 2004.
- [6] André Preumont. *Vibration Control of Active Structures, An Introduction.* 1997.