

## SISTEMA PARA REDUCCIÓN DE ESFUERZOS EN ÁLABES DE TURBINAS EÓLICAS

P. Cruz-Alcántar, E.S Gutiérrez-Wing, E. Martínez-Rayón  
Departamento de Ingeniería Mecánica  
Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico  
Interior Internado Palmira S/N, Cuernavaca, Morelos, 62490, México  
Teléfono ( 777) 362-77-70  
[pca@cenidet.edu.mx](mailto:pca@cenidet.edu.mx); [eswg@cenidet.edu.mx](mailto:eswg@cenidet.edu.mx); [mare@cenidet.edu.mx](mailto:mare@cenidet.edu.mx)

### ABSTRAC

Fatigue is the main cause of mechanical failure of wind turbine blades. It has its origins in the cyclic loads supported by these components throughout their service life. Apart from these loads, quasistatic drag and lift forces produced by the wind also act on the blades and increase their stress levels. Although the latter are not capable of producing fatigue when acting alone, when combined with cyclic loads they can significantly reduce the service life of the blades.

In this paper, the possibility of using a gyroscopic actuator to counteract the effects of static forces in wind turbine blades is evaluated. The blades are modelled as rotating beams mounted in a fixed-free configuration. The role of the actuator is to produce a bending moment that opposes the effects of static loads, in order to reduce overall stress levels

**Keywords:** Wind turbine, active control, gyroscopic actuators and fatigue.

### RESUMEN

La fatiga es el principal mecanismo de falla mecánica de álabes de turbinas de viento. Tiene sus orígenes en las cargas cíclicas soportadas por estos componentes a través de su vida útil. Además de estas cargas, los álabes también soportan las fuerzas de arrastre y sustentación del viento, las cuales incrementan sus niveles de esfuerzo. Aunque estas últimas no son capaces de producir fatiga por sí solas, cuando se combinan con cargas cíclicas pueden reducir significativamente la vida útil de los álabes.

En este trabajo se evalúa la posibilidad de usar un actuador giroscópico para contrarrestar los efectos de las cargas estáticas del viento. Los álabes se modelan como vigas rotatorias en cantiliver. La función del actuador giroscópico es producir un momento flexionante que se opone a los efectos de las cargas estáticas para así reducir los niveles de esfuerzo en el álabes.

**Palabras clave:** Turbinas eólicas, control activo, reducción de esfuerzos, actuador giroscópico, fatiga.

### 1 NOMENCLATURA

$I_1$	Momento de inercia de la viga.	$W_v$	Peso de la viga.
$I_A$	Momento de inercia del disco.	$\omega_{AC}$	Velocidad angular del actuador.
$W_{Gv}$	Peso del actuador giroscópico.	$\Omega_v$	Velocidad de rotación de la viga.
$\delta_y$	Deflexión vertical de la viga.	$L$	Longitud de la viga.

### 2 INTRODUCCION

En turbinas eólicas de eje horizontal, las cargas que soportan los álabes provienen principalmente de dos fuentes: el peso de los álabes y la interacción de éstos con el viento. El efecto del peso varía de acuerdo con la orientación de un álabes a través de un ciclo de giro de la turbina, y se manifiesta en i) un estado de compresión a través del álabes cuando éste está en su posición superior, ii) un estado de tensión a través del álabes cuando éste está en su posición inferior, y iii) un estado combinado de esfuerzos de tensión y compresión cuando éste no está orientado verticalmente. Dado que los esfuerzos causados por el peso dependen de la orientación del álabes, éstos varían cíclicamente con una frecuencia igual a la frecuencia de giro de la turbina.

Por otro lado, las fuerzas del viento sobre los álabes producen momentos que los flexionan ya sea en la dirección del viento o perpendicularmente a ésta. Para un viento de velocidad constante, y suponiendo que los parámetros de operación de turbina tales como el ángulo de ataque de los álabes y la potencia transmitida al generador permanecen constantes, las fuerzas del viento sobre los álabes son esencialmente estáticas.

Aunque usualmente la orientación del eje de las turbinas coincide con la dirección del viento, las fuerzas del viento tienen componentes que actúan tanto en el plano de la turbina como en dirección perpendicular a éste; las primeras son las que se aprovechan para generar electricidad en los sistemas eolieléctricos convencionales y ésta es la razón por la cual al diseñar los álabes de turbinas se trata de maximizar estas fuerzas. Esto, por supuesto, va acompañado de un incremento de los esfuerzos soportados por los álabes; sin embargo, este efecto es inevitable si se desea incrementar la capacidad de generación de la turbina. Las fuerzas normales al plano de giro de la turbina flexionan a los álabes en la dirección del viento y no se aprovechan para generar energía; sin embargo, contribuyen significativamente a incrementar los esfuerzos que soportan los álabes.

Una manera de mitigar los esfuerzos en álabes de turbinas sin afectar la eficiencia de las máquinas es contrarrestar los efectos de las fuerzas normales al plano de giro de la turbina. En la referencia (Gourieres,1983) se describe una turbina en la cual esto se logra mediante tendones atados en un extremo a una extensión del eje de la turbina y por el otro a las puntas de los álabes. Con esta construcción es posible reducir los momentos flexionantes en los álabes, pero la construcción de la turbina se complica notablemente; además se produce una distorsión en el flujo de aire “aguas arriba” de la turbina. Aunque este efecto podría aminorarse utilizando elementos a compresión en la región “aguas abajo”, la complejidad del montaje y el incremento de peso que implica el uso de estos componentes impiden su aplicación en sistemas de alta capacidad de generación.

Una alternativa para lograr un efecto similar al de los tensores sobre los esfuerzos de los álabes es aplicar un momento flexionante en la punta de estos componentes, cuya dirección sea opuesta a los momentos causados por las fuerzas del viento que se desea contrarrestar. Este momento se puede generar por medio de un giroscopio montado en el extremo libre del álabes, de tal manera que al girar la turbina el giroscopio flexione al álabes en dirección contraria a la del viento. La orientación óptima del eje de rotación del giroscopio para producir tal efecto debe ser en dirección radial y en el plano de la turbina. Debido a que la magnitud del momento flexionante producido por el giroscopio es proporcional a su velocidad de rotación sobre su propio eje, la magnitud de dicho momento puede controlarse fácilmente.

En esta investigación se evaluó la posibilidad de generar momentos giroscópicos capaces de reducir los niveles de esfuerzo en una viga giratoria.

### 3 MODELO MATEMÁTICO

#### 3.1 Modelado de álabes

En el modelo utilizado fueron consideradas las fuerzas estáticas causadas por el arrastre del viento y el momento giroscópico causado por un actuador montado sobre el álabes.

Los álabes de una turbina de viento son esencialmente vigas empotradas en el cubo de la nacela de la máquina. El extremo libre gira a una velocidad proporcional a la longitud de la viga y a la velocidad angular de la turbina.

La sección transversal de los álabes es variable, usualmente formada por un mismo perfil aerodinámico cuyas dimensiones absolutas y ángulo de ataque decrecen al aumentar la distancia al centro de giro de la turbina. Este diseño tiene el propósito de usar el material del álabes lo más eficientemente posible: los álabes son más robustos cerca de la raíz dado que es ahí donde prevalecen los máximos niveles de esfuerzo. Los segmentos longitudinales de los álabes que están más alejados del centro de la turbina capturan la mayor parte de la energía del viento, ya que barren un área mayor en cada giro de la turbina. Esta área es proporcional a la distancia que existe entre el segmento en cuestión y el centro de la turbina. Independientemente de la cantidad de energía extraída, las fuerzas que surgen de la interacción del viento con el álabes están uniformemente distribuidas a lo largo de éste.

#### 3.2 Descripción del modelo

##### 3.2.1 Cargas

Para modelar los efectos de las cargas del viento sobre los esfuerzos soportados por los álabes de una turbina eólica es necesario tomar en cuenta lo siguiente:

- ❖ Las fuerzas producidas por el viento son perpendiculares al eje longitudinal del álabes.
- ❖ Para una velocidad constante del viento estas fuerzas son estáticas.
- ❖ Estas fuerzas se distribuyen uniformemente a lo largo del álabes.

Este estudio se enfocó en las componentes de las fuerzas que producen una flexión de los álabes hacia fuera de su plano de giro. Se utilizó una viga giratoria de sección constante, con un extremo empotrado en una plataforma giratoria rígida y con el otro extremo libre. La viga gira en un plano horizontal. Un actuador giroscópico de velocidad regulable se monta en el extremo libre. Por medio de éste es posible aplicar momentos giroscópicos de magnitud controlable sobre la viga.

El peso de la viga rotatoria se utiliza para simular las fuerzas estáticas, transversales y uniformemente distribuidas que actúan sobre los álabes reales. Como el plano de giro de la viga es horizontal, el peso tiende a flexionar la viga hacia afuera de este plano, de manera similar a como lo hacen las fuerzas del viento en álabes reales. El uso de una viga de sección constante garantiza que las fuerzas están uniformemente distribuidas a lo largo de ella.

Debido a que el estudio se centra en el análisis de los efectos de fuerzas transversales sobre los álabes, la sustitución de los álabes por vigas empotradas giratorias resulta adecuada para el estudio. En otros trabajos (Houbolt, J.C& Brooks,G.W.,1957,Simpkinson, S. H.,1946) se han utilizado vigas con propósitos similares para aplicaciones aeronáuticas.

### 3.2.2 Componentes mecánicos

El modelo físico se compone de una viga uniforme rectangular y un actuador giroscópico como se muestra en la Fig. 1. La viga gira en un plano horizontal alrededor del eje vertical  $\underline{Y}$ . El disco del actuador gira en un plano perpendicular al eje longitudinal de la viga y en sentido horario. Con esta configuración es posible controlar la cantidad de movimiento angular,  $\underline{H}$ , del sistema y por consiguiente la magnitud de los momentos giroscópicos que se generan por la rotación combinada de la viga y el actuador.

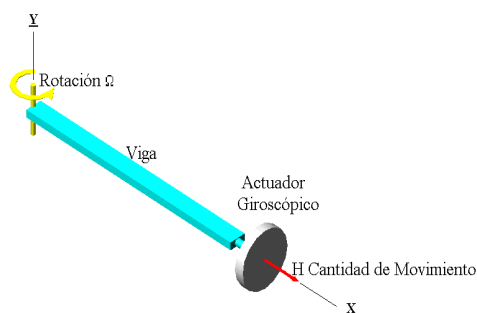


Fig. 1 Viga giratoria con actuador giroscópico en su extremo libre.

El modelo tiene dos grados de libertad: la posición angular,  $\theta$ , alrededor del eje  $\underline{Y}$  y la deflexión vertical de la viga,  $\underline{X}$ . En la Fig. 2 se muestran las cargas y los momentos a los que está sometida la viga.

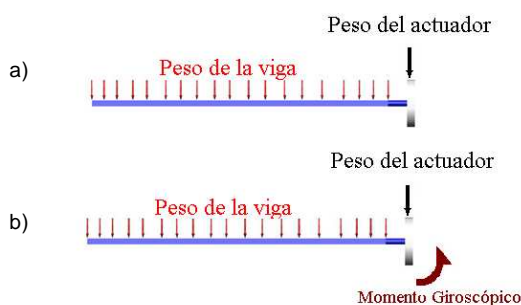


Fig. 2 Cargas y momentos en la viga. a) Viga sin rotación, b) Viga con rotación y actuando el giroscópico.

El peso de la viga se representa como una carga uniformemente distribuida dirigida hacia abajo. Cuando la viga gira alrededor del eje vertical  $\underline{Y}$  se produce una tensión en su interior causado por las fuerzas centrípetas que la mantienen unida al eje de rotación; como consecuencia de esta tensión, el extremo libre se eleva una distancia que es función de la densidad y longitud de la viga, así como de su velocidad de rotación.

Adicionalmente al peso y a las fuerzas ocasionadas por el giro de la viga, un momento giroscópico actúa sobre ésta en su extremo libre. Este momento lo produce el disco del actuador que está montado sobre la viga y que gira con una velocidad constante,  $\Omega$ , alrededor del eje longitudinal de la viga. El momento giroscópico

es proporcional a i) el momento polar de inercia del disco con respecto a su centro, ii) la velocidad de giro del disco y iii) la velocidad de giro de la viga alrededor del eje vertical.

En la Fig. 3 se muestran los efectos de la rotación de la viga y del momento giroscópico sobre las curvas elásticas de la viga. En condiciones estáticas la deflexión de la viga se debe únicamente a su propio peso y al del actuador. La curva elástica correspondiente se indica en verde en la Fig. 3. La rotación de la viga produce fuerzas radiales que resultan en la curva elástica trazada con rojo. La adición de momentos giroscópicos resulta en una elevación ulterior de la viga hasta la curva trazada con azul. Los sentidos de giro de la viga y del actuador deben elegirse de manera que el momento giroscópico produzca una elevación de la viga; en un álabe real esto correspondería a producir una deflexión en dirección contraria a la del viento.

El peso de la viga se representa como una carga uniformemente distribuida dirigida hacia abajo. Cuando la viga gira alrededor del eje vertical  $\underline{Y}$  se produce una tensión en su interior causado por las fuerzas centrípetas que la mantienen unida al eje de rotación; como consecuencia de esta tensión, el extremo libre se eleva una distancia que es función de la densidad y longitud de la viga, así como de su velocidad de rotación.

Adicionalmente al peso y a las fuerzas ocasionadas por el giro de la viga, un momento giroscópico actúa sobre ésta en su extremo libre. Este momento lo produce el disco del actuador que está montado sobre la viga y que gira con una velocidad constante,  $\Omega$ , alrededor del eje longitudinal de la viga. El momento giroscópico es proporcional a i) el momento polar de inercia del disco con respecto a su centro, ii) la velocidad de giro del disco y iii) la velocidad de giro de la viga alrededor del eje vertical.

En la Fig. 3 se muestran los efectos de la rotación de la viga y del momento giroscópico sobre las curvas elásticas de la viga. En condiciones estáticas la deflexión de la viga se debe tanto a su propio peso como al del actuador. La curva elástica correspondiente se indica en verde en la Fig. 3. La rotación de la viga produce fuerzas radiales que resultan en la curva elástica señalada en rojo. La adición de momentos giroscópicos resulta en una elevación ulterior de la viga hasta la curva señalada en azul. Los sentidos de giro de la viga y del actuador deben elegirse de manera que el momento giroscópico produzca una elevación de la viga; en un álabe real esto correspondería a producir una deflexión en dirección contraria a la del viento.

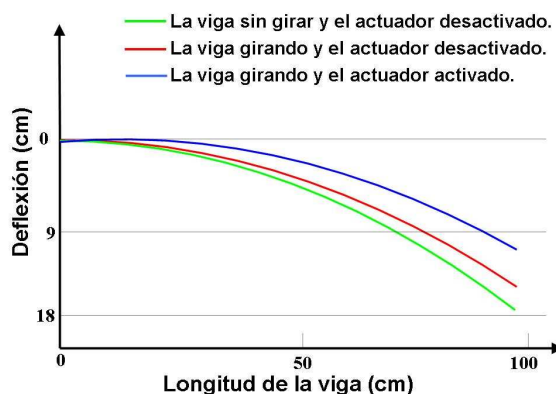


Fig. 3 Efectos de la rotación de la viga y del momento giroscópico sobre las curvas elásticas de la viga.

### 3.3 Ecuaciones de equilibrio estático

A pesar de que tanto el actuador giroscópico como la viga están en movimiento, las fuerzas y los momentos que actúan sobre esta no varían con el tiempo, cuando se ven desde un marco de referencia fijo al álabe; por lo tanto, las relaciones que existen entre las cargas aplicadas a la viga y las deformaciones que estas producen pueden estudiarse por métodos de estática.

Las cargas que actúan sobre la viga giratoria son de tres tipos: i) los pesos de la viga y del actuador giroscópico, ii) las fuerzas de inercia causadas por el giro la viga y iii) el momento giroscópico generado por el actuador.

Dado que las deformaciones que soporta la viga son lo suficientemente pequeñas para mantenerla dentro de un régimen elástico lineal, su deflexión total es igual a la suma de las deflexiones parciales que produciría cada carga actuando por separado.

La deflexión del extremo libre de la viga con respecto a su posición sin cargas está dada por:

$$\delta_y = \frac{L^3}{24EI_1} (8(W_{Gy}) + 3(W_v)) + \frac{(M_i)L^2}{2EI_1} - \frac{(M_G)L^2}{2EI_1}$$

donde:  $M_i = mL^2a$

$$\text{donde: } M_G = I_A \omega_{AC} \Omega_v \quad (1)$$

$$\delta_y = \frac{L^3}{24EI_1} (8(W_{Gy}) + 3(W_v)) + \frac{(mL^2a)L^2}{2EI_1} - \frac{(I_A \omega_{ac} \Omega_r)L^2}{2EI_1}$$

En la ecuación (1) se representa la deflexión total de la viga. La importancia de esta ecuación radica en que incluye los momentos provocados tanto por la fuerza de inercia como por el momento giroscópico. Para el desarrollo del modelo no se consideraron los momentos de torsión, los esfuerzos cortantes ni las fuerzas aerodinámicas que actúan sobre la viga.

#### 4 DISEÑO DEL ACTUADOR GIROSCÓPICO

##### 4.1 Parámetros de diseño

La geometría y los intervalos de velocidad de operación de un actuador giroscópico son parámetros básicos para su diseño. El reto principal en el diseño de un actuador giroscópico es producir el máximo momento giroscópico con un actuador del mínimo peso posible, que pueda alojarse en un espacio predefinido.

La magnitud de los momentos generados por los actuadores giroscópicos del tipo disco depende del momento polar de inercia del disco, así como de sus velocidades de giro y de precesión. En el caso que nos ocupa, esta última es igual a la velocidad de rotación de la viga.

Algunos parámetros de diseño como las propiedades elásticas y geométricas de la viga, así como la ubicación del actuador a lo largo de ella, no afectan la magnitud del momento giroscópico generado por el actuador. Sin embargo, son determinantes de los niveles de deformación y esfuerzo que dicho momento produce en la viga.

Para determinar los valores óptimos de estos parámetros se resolvió numéricamente la ecuación 1 en diferentes intervalos de las variables L, E, I, etc. Esta ecuación representa la deflexión del sistema viga-actuador para distintas condiciones de carga. La Fig. 4(a) presenta la deflexión estática vertical de la viga como función de su longitud, para las condiciones de carga consideradas en el modelo.

En la Fig. 4(a) se muestra la viga en estado de reposo con el actuador giroscópico desactivado. En estas condiciones no se generan momentos giroscópicos; el actuador sólo actúa como una masa concentrada en el extremo libre de la viga.

En la Fig. 4(b,c) se muestran los efectos de las fuerzas de inercia originadas por el giro de la viga, sobre la deflexión de ésta. Se registraron resultados para dos velocidades de rotación: 42 r.p.m. y 50 r.p.m. Se observa que para ambas velocidades la deflexión máxima de la viga es menor que en estado de reposo. Esto se debe a que la rotación da lugar a fuerzas de inercia que actúan radialmente sobre el actuador; dichas fuerzas tienden a elevar el extremo libre de la viga. Cabe destacarse que hasta este punto solamente se está analizando la influencia de las fuerzas de inercia en la deflexión de la viga, pero que aún no se han considerado los momentos giroscópicos. Las mediciones correspondientes a la Fig. 4(b,c) se hicieron con el actuador giroscópico desactivado.

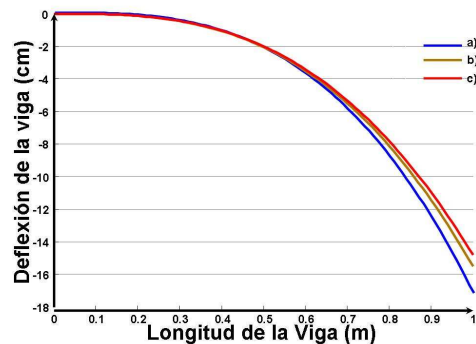


Fig. 4 Deflexión de la viga para varias condiciones de carga: (a) Deflexión de la viga en estado estático, (b,c) Influencia de la fuerza de inercia en la deflexión de la viga.

Tomando en cuenta la ecuación 1, se introdujeron valores de velocidad de rotación, velocidad de precesión y momentos de inercia de discos de varias geometrías. Estos valores fueron seleccionados de acuerdo con los valores deseados de la longitud de la viga, su límite elástico, su velocidad de rotación y el peso del actuador. La velocidad de giro del actuador es importante porque varía linealmente con la magnitud del momento giroscópico que genera. Los actuadores giroscópicos comerciales comúnmente operan en el intervalo de 9000 a 20000 r.p.m. (Peck, M.A., 2000). En este estudio se consideraron velocidades del actuador entre 0 y 20000 r.p.m. para estudiar los efectos del actuador giroscópico sobre la deflexión de la viga en un intervalo amplio. Este intervalo permitió explorar la posibilidad de utilizar motores de menor velocidad para impulsar el disco actuador. En todos los casos la velocidad de precesión se consideró constante. En la Fig. 5 se grafica la deflexión del extremo libre de la viga giratoria como función de la velocidad del actuador. El sentido de giro del actuador se eligió de manera que el momento giroscópico generado tendiera a flexionar a la viga hacia arriba, contrarrestando así los efectos de su peso. Con el actuador en reposo, a 0 r.p.m., la deflexión hacia abajo (negativa) es máxima. Conforme aumenta la velocidad del actuador el momento giroscópico se contrarresta esta deflexión, hasta que se acerca de las 19000 r.p.m. la ha contrarrestado completamente. Para velocidades del actuador superiores a este valor la deflexión de la viga es hacia arriba (positiva).

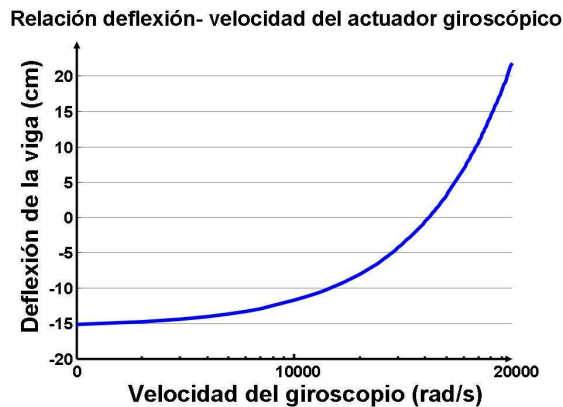


Fig. 5 Relación deflexión -velocidad del actuador con velocidad de precesión constante.

De los resultados de la solución numérica de la Ecuación 1 se observó que la longitud de la viga es un parámetro importante para determinar los efectos del momento giroscópico. Esto es porque los momentos flexionantes causados por el peso del actuador, montado siempre en el extremo libre de la viga, varían linealmente con dicha longitud, y porque estos momentos flexionantes son determinantes de la deflexión de la viga.

A continuación se presenta la deflexión del extremo libre de la viga como función de su longitud, para una velocidad del actuador de 2000 r.p.m. y dos valores distintos de la velocidad de rotación de la viga: 42 r.p.m. (Fig. 6(a)) y 50 r.p.m. (Fig. 6(b)).

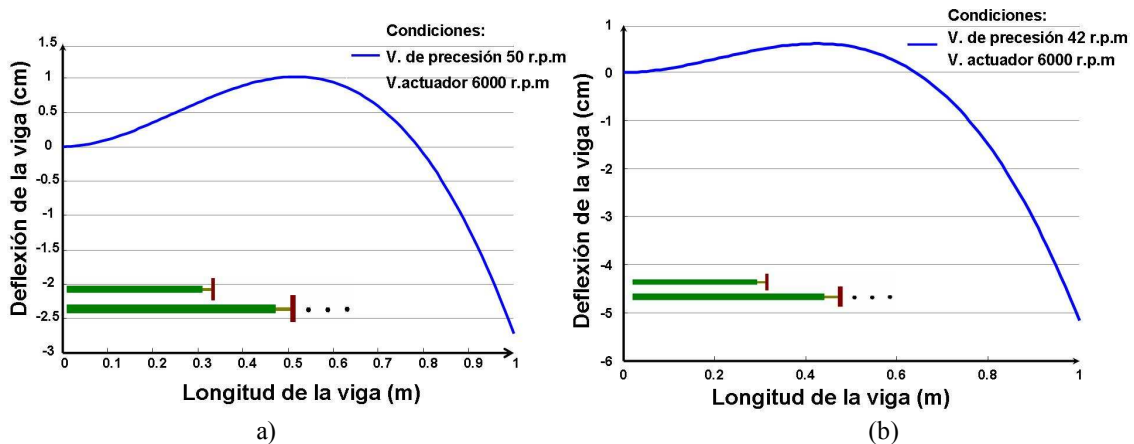


Fig. 6. Efecto del momento giroscópico en relación a la longitud de la viga.

Como puede apreciarse en la Fig. 6, en vigas cortas la deflexión del extremo libre es hacia arriba; esto se debe a que en estas vigas predominan los efectos giroscópicos sobre los efectos combinados de las demás cargas. Conforme aumenta la longitud de la viga aumentan también los momentos flexionantes relacionados con el peso; en vigas suficientemente largas estos momentos producen una deflexión hacia abajo. Esta deflexión podría contrarrestarse incrementando la magnitud del momento giroscópico generado por el actuador; por ejemplo aumentando su velocidad de giro.

#### 4.2 Diseño del actuador giroscópico

Con base en los resultados obtenidos en la sección 4.1, se construyó un primer actuador giroscópico junto con su acoplamiento a un motor de CD que opera en un intervalo de velocidad de 0 – 40000 r.p.m. El actuador fue utilizado en las primeras pruebas experimentales realizadas, en las cuales se determinó que el peso del actuador provocaba deformaciones estáticas excesivas en la viga. Para resolver este problema, se construyó un segundo actuador tratando de reducir su peso y aumentar su momento de inercia, pero solamente se pudo aumentar el momento de inercia conservando su mismo peso.

Se buscaron nuevas alternativas para su diseño del actuador giroscópico para reducir su peso. El primer punto de análisis fue el peso del motor, puesto que proporcionaba gran parte del peso del actuador. Así, se diseñó y construyó el actuador mostrado en la Fig. 7. Éste se compone de un motor, un par de rodamientos y un acoplamiento para la instalación de un eje flexible.

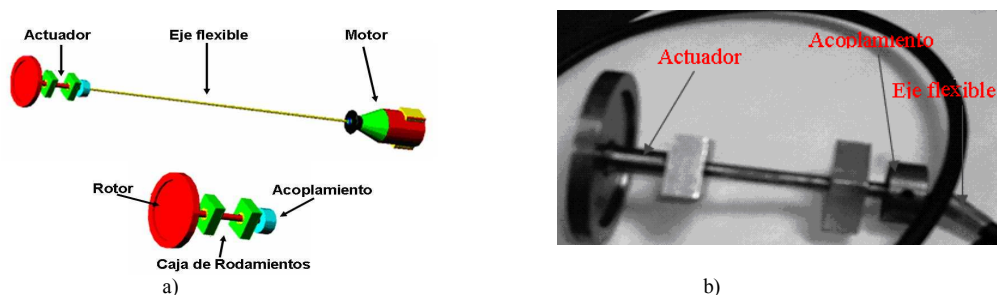


Fig. 7 Montaje final del sistema de viga rígida actuador.

## 5 DISEÑO EXPERIMENTAL

### 5.1 Construcción de banco de pruebas

Para la parte experimental se requería una estructura sólida para colocar una viga con restricción en cantiliver con la capacidad de rotar en el plano horizontal y flexionarse en el plano vertical. Esto se logró con un banco que soporta un rodamiento de tipo brida y una plataforma giratoria rígida. La Fig. 8 muestra el banco y sus componentes.

La plataforma giratoria rígida se ensambla a una flecha, en la cual se colocan anillos de deslizamiento que alimentan eléctricamente al actuador giroscópico, y también sirve para transmitir señales eléctricas.

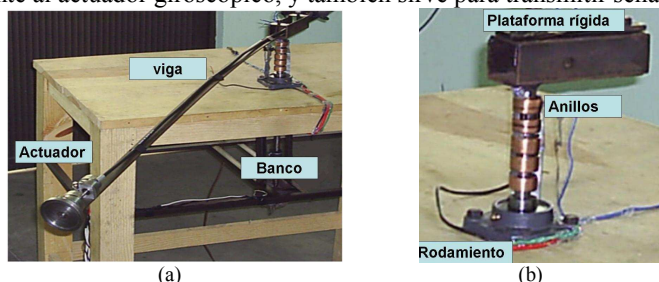


Fig. 8 (a) Estructura y componentes del banco, (b) Plataforma giratoria rígida y anillos de deslizamiento.

La selección de la viga para la experimentación es importante, puesto que se requiere una viga con propiedades de rigidez que permitan la deflexión necesaria para observar el efecto de los momentos giroscópicos. Así, una viga demasiado rígida convertiría los momentos giroscópicos en esfuerzos internos en la viga, con desplazamientos de deformación menores difíciles de detectar por un sistema de medición de desplazamiento. Por tanto, se seleccionó una viga con geometría y dimensiones que permitan generar desplazamientos significativos. La viga seleccionada para la experimentación tiene una longitud de 1.5 m,



pero es posible variar su longitud mediante el deslizamiento de la misma sobre su soporte. Principalmente se trabajó a una longitud de 1 m, con el propósito de evitar trabajar en la zona elástica de la viga.

La dificultad que se presentó antes de contar con un sistema de medición de desplazamientos fue que los momentos giroscópicos que se presentaron fueron pequeños y no se podía apreciar el efecto que provocado por los momentos giroscópicos a simple vista.

Para subsanar lo anterior y para la mejor comprensión del fenómeno se realizaron pruebas en un arreglo de una viga rígida angular soportada por un mecanismo de bisagra. Esto permite que la viga se desplace en el plano vertical mientras gira en el plano horizontal Fig. 9.

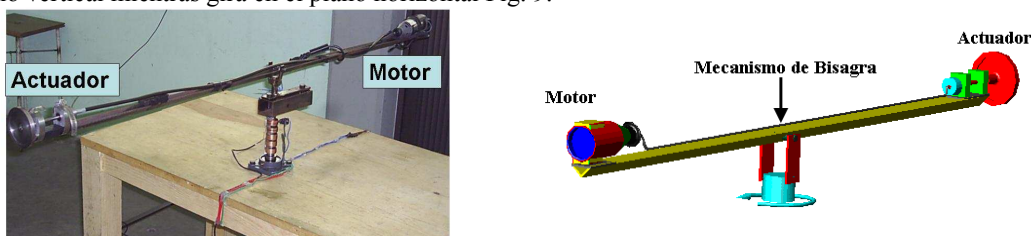


Fig. 9 Montaje final del sistema de viga rígida actuador.

Las pruebas con el mecanismo de bisagra y viga rígida consistieron primeramente en balancear estáticamente el conjunto viga, actuador y motor (Fig. 9). Una vez balanceado el mecanismo se pone en rotación la viga y posteriormente se activa el actuador giroscópico controlando su velocidad desde 0 a 20000 r.p.m.

Al estar en rotación la viga no se pierde el equilibrio estático, se mantiene girando en el plano horizontal sin mostrar inclinación. Las variaciones en la inclinación de la viga se presentan en el instante de activar el actuador giroscópico. El fenómeno se manifestó de la siguiente manera:

1.- En la Fig. 10(a) se muestra la posición de la viga en reposo estáticamente balanceada (línea punteada), y la posición del sistema cuando el actuador giroscópico está activado. Para este caso, la rotación de la viga y del actuador giroscópico son en el mismo sentido (antihorario). Esto provoca un momento giroscópico en el extremo de la viga en sentido horario (+), por lo que el lado del actuador se mueve hacia arriba.

2.- Para el segundo caso Fig.10 (b), la rotación de la viga y la del actuador giroscópico son en sentidos opuestos, esto provoca un momento giroscópico en el extremo de la viga en sentido antihorario (-), el lado del actuador se desplaza angularmente hacia abajo.

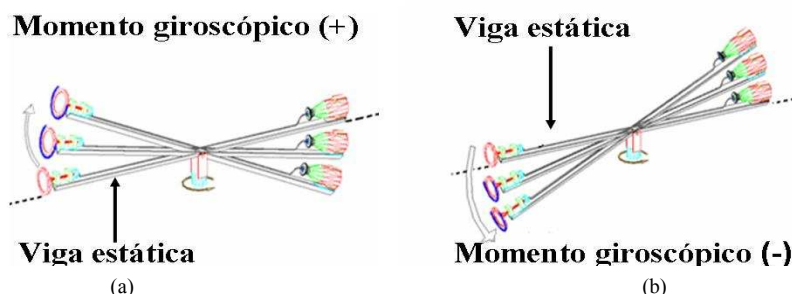


Fig. 10 Condiciones de rotación en la viga rígida: (a) mismo sentido de rotación, (b) sentidos de rotación opuestos.

Las pruebas realizadas en el sistema viga rígida bisagra demostraron la presencia de momentos giroscópicos en el extremo de la viga, manifestándose como un desplazamiento angular de la viga en el plano vertical. De la misma manera, este momento giroscópico está presente en el sistema de viga flexible, ya que presenta las mismas condiciones solamente variando la rigidez.

## 6 RESULTADOS EXPERIMENTALES

Se realizaron pruebas utilizando la viga flexible mostrada en la Fig. 8(a). Las pruebas se realizaron para las dos velocidades de precesión propuestas a 42 y 50 r.p.m, y para cinco etapas de velocidad del actuador giroscópico en un intervalo de 0 a 20000 r.p.m

En la Fig. 11 se muestran los valores experimentales obtenidos con respecto a la deflexión de la viga en las cinco etapas de velocidad del actuador giroscópico. En la parte derecha la etapa o velocidad del actuador giroscópico, y en el lado izquierdo la deflexión de la viga medida en milímetros. En estas figuras se tienen tres curvas indicadas con los colores verde, azul y rojo.

- La curva en verde representa la deflexión estática de la viga sin efecto de rotación o momento giroscópico.



- La curva en rojo representa la deflexión de la viga, la cual está en rotación, y es afectada por la fuerza de inercia en sus respectivas velocidades de rotación. El momento giroscópico aún no interviene en esta etapa.
- La curva en azul representa la deflexión de la viga afectada por la fuerza de inercia y por el momento giroscópico en el extremo libre de la viga.

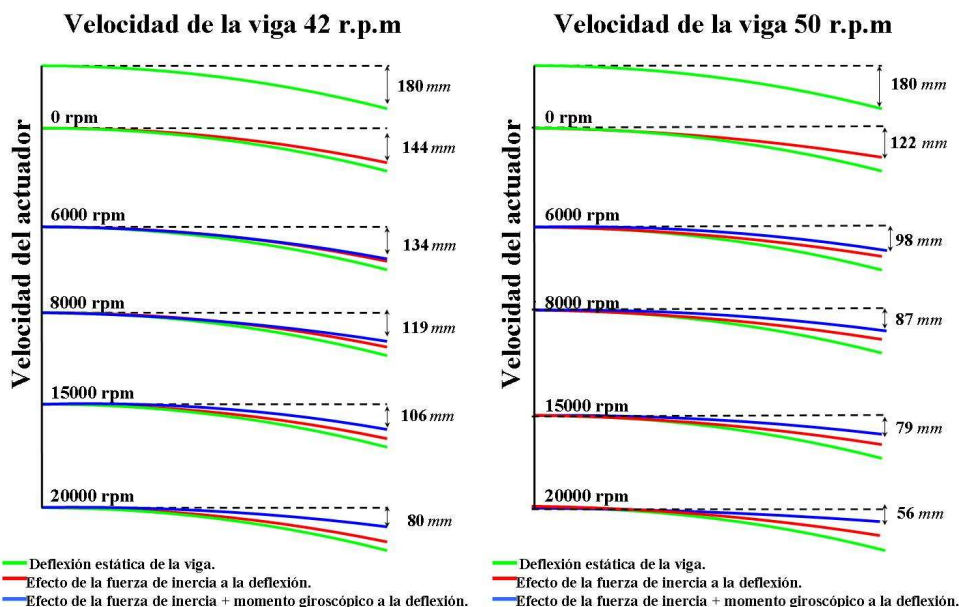


Fig. 11 Deflexiones: (a) Deflexiones de la viga a una velocidad de precesión de 42 r.p.m , (b) Deflexiones de la viga a una velocidad de precesión 50 r.p.m

De las figuras anteriores se tomaron las deflexiones para el cálculo los momentos provocados por la fuerza de inercia y de los momentos giroscópicos. Éstos últimos contrarrestan los momentos causados por el peso del actuador y por la distribución del peso de la propia viga.

La tabla 3 presenta la magnitud de los momentos giroscópicos con respecto a la velocidad de giro de la viga y la velocidad de rotación del actuador giroscópico. Los resultados son para la velocidad de rotación de la vida de 42 r.p.m y 50 r.p.m respectivamente para cinco etapas de velocidad del actuador giroscópico.

**Tabla 3:** Momentos giroscópicos generados a 42 y 50 r.p.m, respectivamente.

Velocidad de rotación de la viga (r.p.m.)	Velocidad del actuador (r.p.m)	Momento giroscópico (Nm)	Velocidad de rotación de la viga (r.p.m.)	Velocidad del actuador (r.p.m)	Momento giroscópico (Nm)
42	0	0	50	0	0
	6000	0.3387		6000	0.8382
	8000	0.8618		8000	1.2127
	15000	1.3195		15000	1.5098
	20000	2.2151		20000	2.3004

Como se puede apreciar en las tablas anteriores, la magnitud de los momentos giroscópicos generados bajo las condiciones experimentales es pequeña y su mayor magnitud se presenta en las condiciones de rotación de la viga de 50 r.p.m y velocidad de rotación del actuador giroscópico de 20000 r.p.m. La magnitud de este momento giroscópico es equivalente a 2.30 Nm; aunque es pequeño en magnitud, contribuye a contrarrestar los momentos flexionantes provocados por el peso del actuador y por la distribución del peso de la propia viga.

### 6.1 Reducción de los esfuerzos en la raíz de la viga a causa del actuador giroscópico

La deflexión y los esfuerzos en el modelo de la viga en cantiliver son conceptos y magnitudes inherentes. Así, partiendo de la deflexión de la viga obtenemos la magnitud de los esfuerzos en la zona crítica, la raíz de la viga.

El objetivo de la técnica presentada aquí es reducir los esfuerzos flexionantes en la raíz de la viga: el punto de atención fue la medida de la deflexión que es una variable que puede estimarse y medirse que manera convencional.

Bajo las condiciones planteadas, en la viga se tenía un esfuerzo flexionante de  $191.73 \frac{N}{mm^2}$  provocado por la distribución de la viga, el peso del eje flexible y el peso del actuador giroscópico concentrado en el extremo libre de la viga y cuando intervienen los momentos giroscópicos en la deflexión de la viga los esfuerzos se reducen a  $134.8 \frac{N}{mm^2}$ , gracias a la incorporación del actuador giroscópico.

El momento giroscópico redujo un 29.6 % los esfuerzos flexionantes presentes en la raíz de la viga. Los resultados anteriores reflejan los beneficios de esta técnica en la reducción de los esfuerzos. Se debe dejar en claro que no se tomó en cuenta la aportación del momento inercial o centrífugo en la magnitud de los esfuerzos; el porcentaje mencionado solamente manifiesta el efecto del actuador giroscópico y el momento giroscópico generado.

## 7 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Aunado a los momentos giroscópicos también se generaron momentos a causa de la fuerza de inercia del sistema al estar en rotación. Éstos son comparados en la siguiente tabla con los momentos giroscópicos generados por el actuador en las etapas de velocidad de giro del actuador.

**Tabla 4:** Comparación: Momento por fuerza de inercia-Momento giroscópico.

Velocidad del actuador (r.p.m)	Momento por fuerza inercial a 42 r.p.m. (Nm)	Momento giroscópico (Nm)	Velocidad del actuador (r.p.m)	Momento por fuerza inercial a 50 r.p.m. (Nm)	Momento giroscópico (Nm)
0		0	0		0
6000		0.3387	6000		0.8382
8000		0.8618	8000		1.2127
15000	0.9649	1.3195	15000	1.7137	1.5098
20000		2.2151	20000		2.3004

Los momentos provocados por las fuerzas inercia son constantes durante la rotación de la viga, ya que ésta tiene una velocidad constante de 42 r.p.m o 50 r.p.m. Los momentos a causa de la fuerza de inercia son mayores en las dos primeras etapas o velocidades del actuador giroscópico pero en las dos últimas etapas el momento giroscópico es mayor.

## 8 CONCLUSIONES

La técnica presentada en este artículo es una alternativa viable para el control y reducción de la magnitud de los esfuerzos en álabes de turbinas eólicas.

Los momentos giroscópicos generados por el actuador o compensador giroscópico en el extremo libre de la viga ayudan a contrarrestar los momentos flexionantes provocados por el peso del actuador y el peso de la viga. La reducción de los esfuerzos en la raíz de la viga se redujo aproximadamente 29.6 % del total generado por las cargas presentes.

## 9 REFERENCIAS

- [1] Gourieres,L.”*Energía eólica: teoría, concepción y cálculo práctico de las instalaciones*,” Editorial Enrolles, Primera edición, Paris.1983.
- [2] Houbolt, J.C& Brooks,G.W “*Differential Equations of motion for combined flapwise bending, chordwise, and torsion of twisted no uniform rotor blades*,” Supersedes NACA Technical note 3995,1957.
- [3] Simpkinson, S. H, “*Effect of Centrifugal Force on The Elastic Curve of a Vibrating Cantilever Beam*,” National Advisory Committee for Aeronautics, September 1946.
- [4] Peck,M.A, “*Practicable Gyroelastic Technology*,” Honeywell Defense and Space Electronics Systems,2000.