



## **8º CONGRESO IBEROAMERICANO DE INGENIERIA MECANICA**

Cusco, 23 al 25 de Octubre de 2007

### **MODELO DE UN AEROGENERADOR DE BAJA POTENCIA Y BAJO COSTE.**

**Daniel Clos Costa\*, Teodoro Sánchez Campos°**

\* Dep. de Ingeniería Mecánica. Universidad Politécnica de Catalunya. España.

° Soluciones Prácticas ITDG

\*e-mail: daniel.clos@upc.edu

#### **RESUMEN**

En este trabajo se presenta un modelo dinámico, a implementar en un programa de simulación de mecanismos, del aerogenerador de baja potencia IT-PE-100 desarrollado por ITDG Practical Action. Con este modelo se obtiene una herramienta útil para el estudio de posibles mejoras en el diseño mecánico del aerogenerador que permitan mejorar su rendimiento energético y su confiabilidad. A partir de la fuerza del viento que actúa sobre el sistema, obtenida de un estudio aerodinámico, y de las características electromecánicas del generador eléctrico, el programa simula el comportamiento dinámico del aerogenerador. Así, variando los datos de partida, se obtiene el comportamiento del sistema para distintas condiciones de viento y de generación de electricidad.

Actualmente el sistema de control aerodinámico del aerogenerador es efectivo y constructivamente muy simple pero presenta algunas características mecánicas a mejorar: el sistema de protección desaprovecha gran parte de la energía del viento y en especial en la franja de altas velocidades del viento y, con viento no constante, da lugar a oscilaciones y vibraciones no deseadas de la cola de orientación que comprometen la integridad del aerogenerador. Con la simulación del sistema se puede estudiar la influencia de los distintos parámetros que intervienen en su construcción así como el efecto de las mejoras que se propongan.

**PALABRAS CLAVE:** Energía. Aerogenerador. Simulación. Mecanismos.

**CODIGO 1124**

## INTRODUCCIÓN

En agosto de 2006 tuvo lugar en Cajamarca (Perú) una reunión entre Practical Action (Programas internacionales y oficina de América Latina), Ingeniería Sin Fronteras-Catalunya y la Universidad Politécnica de Catalunya (UPC). En ella se sentaron las bases para el diseño de un programa internacional promovido por las tres entidades bajo el título "Development and Dissemination of Micro Wind Energy Generation Systems in Developing Countries (Micro-WEGS)", cuyo coordinador principal es Teodoro Sánchez, asesor de tecnologías y políticas de energía de Practical Action.

Uno de los objetivos que se contempla en este proyecto es la mejora del rendimiento y de la robustez del aerogenerador IT-PE-100, aerogenerador tripala de 100 W desarrollado por Practical Action-ITDG [1, 2] que actualmente se está utilizando en algunos proyectos piloto de abastecimiento de electricidad en comunidades rurales del Perú. Para cumplir este objetivo se ha empezado en la UPC un proyecto de mejora técnica del aerogenerador cuyos objetivos principales son:

- Mejorar el rendimiento general del aerogenerador a partir del rediseño del sistema de cola plegable de modo que se pueda conseguir su funcionamiento en régimen de giro óptimo en el mayor rango posible de velocidades del viento.
- Mejorar su robustez frente a vientos no constantes intentado incidir en el control de las vibraciones que se inducen tanto por los vientos como por el propio funcionamiento del sistema.
- Mantener el diseño del aerogenerador dentro del concepto de tecnología apropiada; sencillo, de bajo coste, confiable, fácil de mantener y, sobre todo, realizable por talleres o microempresas locales con un mínimo de materiales y componentes importados.

Hasta la fecha no se ha realizado ningún modelo completo del aerogenerador que permita estudiar su dinámica general y solo existen estudios realizados del rotor eólico y del generador eléctrico [1, 2].

## METODOLOGÍA

En el desarrollo de este proyecto se prevén 3 fases, la primera de las cuales es la que se está realizando en este momento y que se presenta en este trabajo.

La primera fase consiste en el desarrollo de un modelo dinámico del aerogenerador para poder reproducir, mediante un programa de simulación de sistemas mecánicos, su comportamiento para distintas condiciones de viento y de generación de electricidad. Este modelo se implementará en un programa de simulación de mecanismos de ámbito general (ADAMS de MSCSoftware) que se encarga del planteamiento y resolución numérica de las ecuaciones dinámicas del sistema a partir de los parámetros que se le proporcionan y que se han obtenido de un aerogenerador IT-PE-100 del que se dispone en la UPC.

La segunda fase consiste en la instalación en el campus universitario de la UPC de Viladecans (España) del aerogenerador IT-PE-100 que se ha utilizado para obtener los parámetros del sistema. Esta instalación, monitorizada convenientemente, se utilizará para la validación del modelo y la simulación desarrollados.

En la tercera fase, una vez el modelo esté validado, se usará la simulación para conocer la sensibilidad de los distintos parámetros que definen el aerogenerador y plantear y estudiar posibles mejoras en el diseño del mismo. Las modificaciones se probarán aprovechando la instalación experimental del aerogenerador IT-PE-100 en el campus de Viladecans.

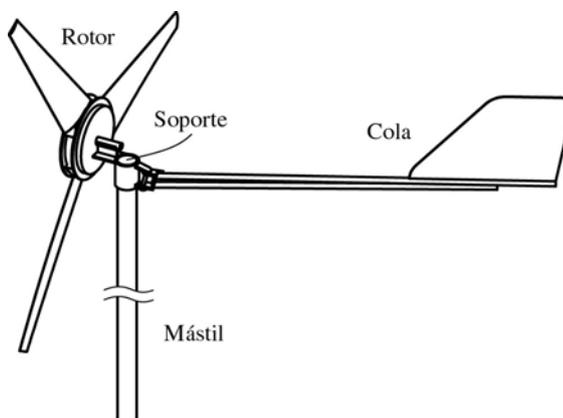


Figura 1: Esquema general del aerogenerador IT-PE-100.

## MODELO DINÁMICO DEL AEROGENERADOR

El aerogenerador está formado por 3 conjuntos de piezas que se modelizan como sólidos rígidos: el conjunto formado por las palas y el rotor del generador de imanes permanentes (en adelante *rotor*), el conjunto formado por el estator del generador y el elemento que permite la orientación vertical del aerogenerador (en adelante *soporte*) y la cola de orientación (en adelante *cola*) (figura 1). El mástil se modeliza como sólido flexible con su extremo inferior rígidamente unido a la base.

La cola y el rotor se articulan sobre el soporte y este sobre el mástil lo que permite los 3 grados de libertad del sistema: rotación del rotor respecto al soporte para la generación de electricidad, rotación de la cola respecto del soporte para el control de la velocidad de rotación de las palas y rotación de todo el conjunto respecto del suelo para la orientación hacia el viento. Estas 3 posibles rotaciones se modelizan como pares cinemáticos de revolución (articulaciones).

Sobre estos 3 sólidos actúan fuerzas y momentos, tanto externas como internas, que hay que modelizar: el peso, las fuerzas de enlace, las fuerzas aerodinámicas sobre las palas y la cola, las fuerzas de rozamiento en las articulaciones y los pares provocados por el generador eléctrico (figura 2).

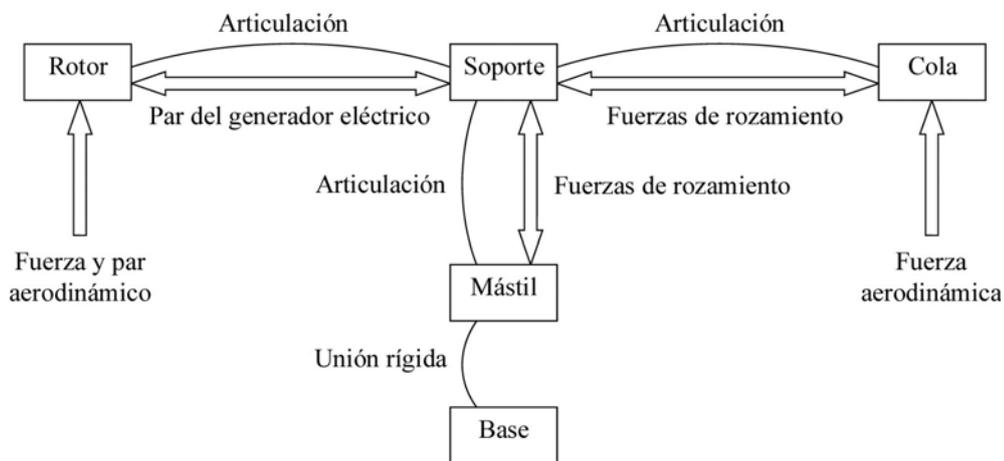


Figura 2: Diagrama con todos los elementos que se consideran en el modelo: sólidos, enlaces y fuerzas.

### Sólidos

Cada uno de los sólidos se caracteriza por elementos geométricos, puntos y rectas, y por sus características inerciales: posición del centro de inercia, masa y tensor de inercia. Todos los datos se definen en un triedro de referencia fijo a cada sólido. Los valores concretos para el aerogenerador IT-PE-100 se han obtenido a partir de medidas experimentales, del documento referenciado [2] y reproducciones en un programa de CAD.

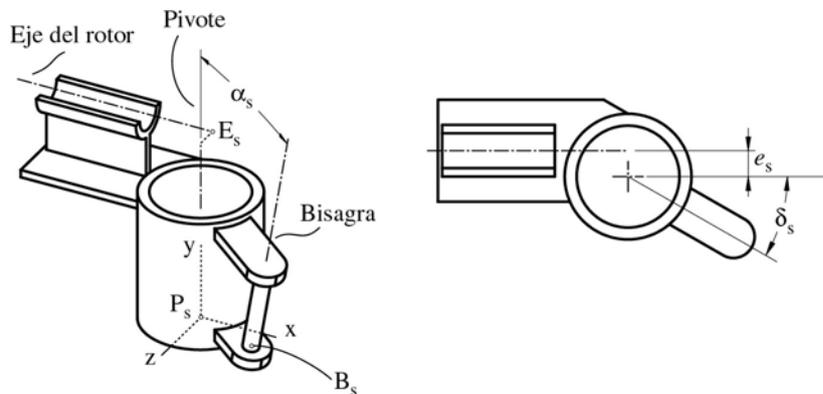


Figura 3: Esquema del soporte donde se aprecian los 3 ejes y los principales parámetros que lo definen.

*Soporte:* Sobre el soporte se definen 3 ejes (Fig. 3): el eje del rotor, el eje vertical o pivote y el eje con la cola o bisagra. Los puntos  $E_s$ ,  $P_s$  y  $B_s$  son puntos de estos ejes que se utilizarán para definir los enlaces. El eje del rotor es perpendicular al pivote y lo cruza a una distancia  $e_s$ . La bisagra forma un ángulo  $\alpha_s$  con el pivote y se encuentra en un plano vertical girado  $\delta_s$  respecto al plano vertical que contiene el eje del rotor. En el modelo de aerogenerador IT-PE-100 que se está estudiando el ángulo  $\delta_s$  es nulo (ver la tabla 1) pero se ha incluido en el modelo pues se prevé una posible modificación en este sentido.

Para poder modelizar posteriormente las fuerzas de rozamiento en la articulación es necesario conocer la longitud  $L_p$  y el diámetro  $d_p$  del tubo del pivote.

En la figura 3 se muestran los parámetros geométricos más importantes que definen el soporte. No se incluye en el dibujo el estator del generador de imanes permanentes para mayor claridad del dibujo.

Tabla 1: Parámetros geométricos del soporte para el aerogenerador IT-PE-100

Parámetro	unidades	valor
$P_s$ . punto del eje del rotor	mm	{0, 0, 0}
$E_s$ . punto del pivote	mm	{0, 145,5, -18,5}
$B_s$ . punto de la bisagra	mm	{67, 10, 0}
$e_s$ . excentricidad del rotor	mm	18,5
$\alpha_s$	°	14
$\delta_s$	°	0
$L_p$	mm	105
$d_p$	mm	73

*Cola:* El eje de la bisagra se define mediante el punto  $B_c$  y el eje  $y$  del triedro propio. El centro de inercia  $G_c$  y el punto de aplicación de las fuerzas aerodinámicas  $C_c$  sobre el vano son los otros 2 puntos que definen la cola (figura 4). Para la correcta modelización de las fuerzas aerodinámicas es necesario conocer la superficie del vano  $S_c$  y la orientación de este: en el modelo IT-PE-100 estudiado el vano está en el plano  $xy$  del triedro de la cola, si bien posibles modificaciones que se prevén han llevado a plantear un modelo más general y incluir en el mismo el ángulo  $\alpha_c$ . La rotación del vano es alrededor de un eje inclinado un ángulo  $\gamma_c$  a una distancia  $e_c$  del origen. Para poder modelizar posteriormente las fuerzas de rozamiento en la bisagra es necesario conocer la longitud  $L_b$  y el diámetro  $d_b$ .

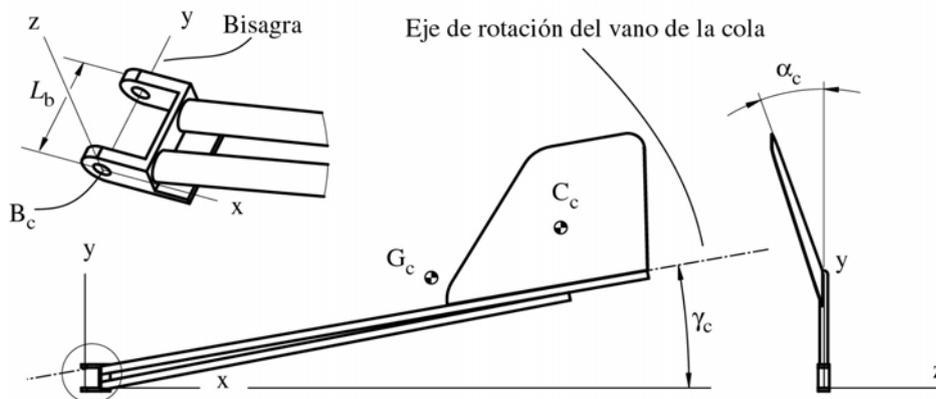


Figura 4: Esquema de la cola.

Tabla 2: Parámetros geométricos de la cola para el aerogenerador IT-PE-100

Parámetro	unidades	valor
$B_c$ . punto de la bisagra	mm	{0, 0, 0}
$G_c$ . centro de inercia	mm	{874, 257, 0}
$C_c$ . centro de empuje	mm	{1284, 468, 0}
$\alpha_c$	°	0
$\gamma_c$	°	10
$e_c$	mm	49
$L_b$	mm	73
$d_b$	mm	12,5
$S_c$	m <sup>2</sup>	0,1749

*Rotor:* El rotor se define geoméricamente mediante un eje y tres puntos alineados sobre este eje;  $E_r$  para definir la articulación con el soporte,  $C_r$  para definir el punto de aplicación de las fuerzas aerodinámicas y  $G_r$  para definir el centro de inercia (figura 5). No es necesario definir el perfil aerodinámico de las palas pues éste se tendrá en cuenta en la modelización de las fuerzas y los pares aerodinámicos.

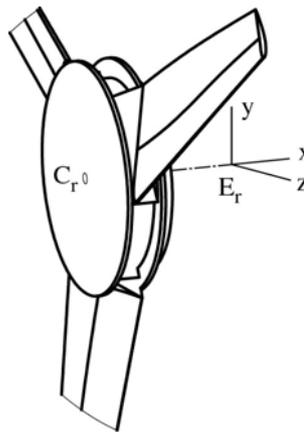


Figura 5: Esquema del rotor.

Tabla 3: Parámetros geométricos del rotor para el aerogenerador IT-PE-100

Parámetro	unidades	valor
$E_r$ . punto del eje	mm	{0, 0, 0}
$G_r$ . centro de inercia	mm	{-170, 0, 0}
$C_r$ . centro de empuje	mm	{-209, 0, 0}

*Mástil:* La consideración o no de la flexibilidad del mástil depende de los resultados que se quieren obtener de la simulación. Un primer modelo considera el mástil rígido y se usará para validar las modelizaciones de las fuerzas aerodinámicas y electromecánicas a partir de la instalación experimental. Posteriormente se considerará el modelo con mástil flexible para estudiar el efecto de las oscilaciones sobre todo el sistema y optimizar su construcción y situación de los sensores. La modelización como sólido flexible se hará a partir de la inclusión de algunos de sus modos propios de vibración en el programa de simulación de mecanismos utilizado.

Sobre el extremo superior del mástil se define un eje vertical y un punto  $P_m$  para su articulación con el soporte. En el caso de mástil modelizado como sólido rígido éste es fijo a la base i no introduce ningún grado de libertad adicional. Si la modelización es como sólido flexible se introducen tantos grados de libertad como modos propios se hayan incluido.

### Enlaces

La modelización de los enlaces en el programa de simulación no presenta ninguna dificultad pues se modelizan como pares cinemáticos de revolución. El programa establece las ecuaciones de enlace y las ecuaciones dinámicas correspondientes y resuelve el sistema algébrico-diferencial resultante.

### Fuerzas

*Fuerzas de rozamiento:* Las articulaciones del mástil y de la cola presentan un par de rozamiento bastante elevado debido a que no se utiliza ningún tipo de cojinete y el contacto es acero-acero sin pulir. Para modelizar estas fuerzas se tiene en cuenta la geometría del contacto (diámetro y longitud de la articulación) y la existencia de holguras importantes. Las fuerzas se modelizan usando el modelo de rozamiento seco de Coulomb y la determinación de los coeficientes de rozamiento estático y dinámico se hace experimentalmente sobre el aerogenerador. El programa de simulación empleado permite tener en cuenta el fenómeno *stick-slip* que se puede dar en estas dos articulaciones.

En la articulación del rotor se usan rodamientos y no se consideran perdidas por rozamiento.

*Fuerzas aerodinámicas:* Las fuerzas producidas por la presión eólica se modelizan como curvas características fuerza-velocidad que dependen de las características geométricas de las palas del rotor y el vano de la cola. Sobre las palas actúa también un *par motor* cuya curva característica se extrae de los estudios experimentales realizados en el aerogenerador IT-PE-100 en Perú [3]. Estas curvas características se pueden introducir sin problemas en el programa de simulación de mecanismos utilizado. Una vez se haya instalado y monitorizado el aerogenerador en Viladecans se ajustarán estas curvas adecuadamente.

*Par electromagnético:* La resistencia que ofrece el generador de imanes permanentes al giro se modeliza como un par resistente que actúa sobre el rotor (y su reacción sobre el soporte). Sus curvas características par-velocidad se extraen también de los estudios realizados en Perú [3] y se ajustaran en la instalación experimental.

### SIMULACIONES A REALIZAR

Una vez introducido el modelo completo en el programa de simulación de mecanismos se pueden simular distintas situaciones dando como parámetros de entrada la velocidad y dirección del viento (constantes o variables) y el sistema de carga de las baterías. Las primeras simulaciones deben servir para validar el modelo, en especial las fuerzas aerodinámicas y electromecánicas.

Sin introducir ninguna modificación en el modelo del aerogenerador IT-PE-100 se prevén simulaciones destinadas a determinar la sensibilidad de los distintos parámetros que definen el sistema; las tecnologías usadas en la construcción del aerogenerador no permiten según qué precisiones de fabricación y es por lo tanto importante poder establecer qué dimensiones son críticas y cuales no.

El sistema de plegado de cola no es eficiente pues comienza el plegado cuando el aerogenerador no ha alcanzado aun su velocidad óptima; deberá estudiarse una modificación en los ángulos que definen la bisagra de la cola para conseguir que el rotor eólico y el generador eléctrico funcionen, en el mayor rango posible de velocidades de viento, a su velocidad de diseño. La figura 6 muestra una secuencia de 6 imágenes de una simulación realizada con el modelo descrito. En las 3 primeras imágenes el aerogenerador se orienta al viento y en las 3 siguientes se observa el proceso de plegado. La figura 7 reproduce las 3 últimas imágenes de la secuencia anterior desde una vista lateral donde se observa fácilmente el levantamiento de la cola durante el proceso de plegado.

Por último, introduciendo la flexibilidad del mástil en el modelo, deben estudiarse las vibraciones de todo el sistema. Estas son producidas por posibles desequilibrios del rotor (solo se prevé en su construcción un equilibrado estático), y por las propias oscilaciones de la cola en presencia de vientos no constantes. La correcta situación de los tensores del mástil puede paliar el efecto de las vibraciones inducidas y aumentar la robustez del conjunto.

El modo como se ha definido el modelo permite adaptarlo rápidamente al análisis y diseño de aerogeneradores de más potencia tal como se prevé en el programa internacional "Development and Dissemination of Micro Wind Energy Generation Systems in Developing Countries (Micro-WEGS)"

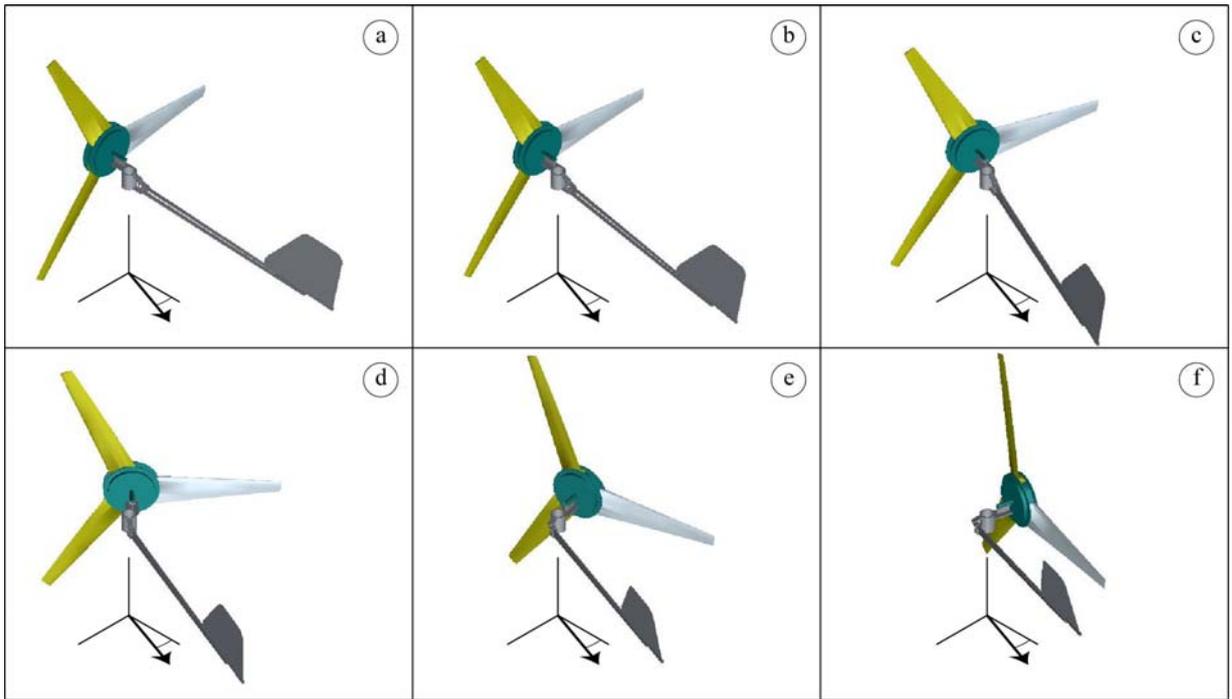


Figura 6: Secuencia del movimiento del aerogenerador. La flecha indica la dirección del viento. *a*: posición inicial sin viento. *a*, *b* y *c*: reorientación del aerogenerador. *d*, *e* y *f*: Si la velocidad del viento es elevada se produce el plegado de la cola desorientando el rotor eólico de la dirección del viento.

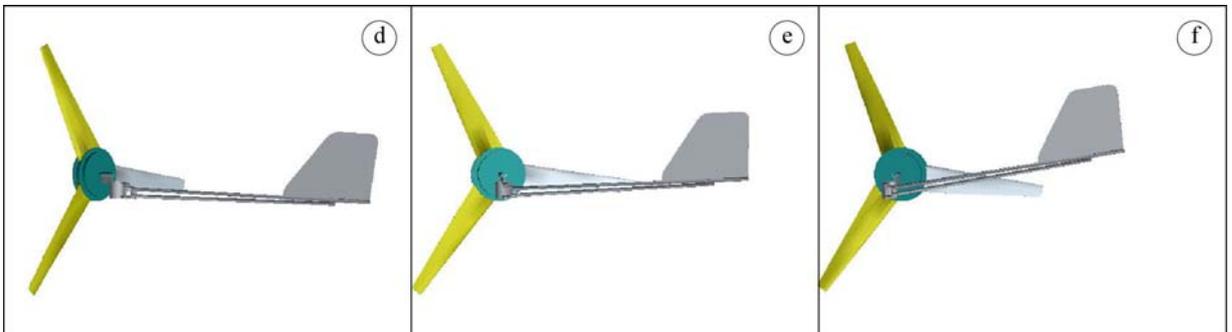


Figura 7: Vista lateral las posiciones *d*, *e* y *f* de la secuencia de la figura 6. Se observa con claridad como la cola se levanta incrementando su energía potencial hasta llegar a una posición de equilibrio.

## REFERENCIAS

1. T. Sánchez Campos, S. Ramírez Atahui y C. Dávila Vázquez. Desarrollo tecnológico de microgeneradores eólicos. IX Encuentro Latinoamericano y del Caribe Sobre Pequeños Aprovechamientos Hidroenergéticos.
2. T. Sánchez Campos, S. Fernando y H. Piggott. Wind rotor blade construction. Small wind systems for battery charging. Documento de trabajo.
3. T. Sánchez Campos, J. E. Chiroque. Evaluación y Caracterización de un Aerogenerador de 100 W. Soluciones Prácticas-ITDG, 2002
4. H. Piggott. How to build a wind turbine. The axial flux windmill plans. 2005