

Cinemática de alas batientes para micro vehículos aéreos

Bruno A. Roccia⁽¹⁾, Sergio Preidikman^(1,2) y Julio C. Massa^(1,2)

⁽¹⁾ *Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Río Cuarto, Ruta Nacional 36 Km. 601, 5800 Río Cuarto, Argentina. e-mail: broccia@ing.unrc.edu.ar*

⁽²⁾ *Departamento de Estructuras, Facultad de C. E. F. y N., Universidad Nacional de Córdoba, Casilla de Correo 916, (5000) Córdoba, Argentina. e-mail: spreidikman@efn.uncor.edu*

RESUMEN

Este trabajo es parte de un esfuerzo mucho mayor que se encuentra en desarrollo y cuyo objetivo es obtener herramientas para estudiar la aeroservoelasticidad de micro-vehículos aéreos de alas batientes inspirados en la biología. Las aves y los insectos han desarrollado modos de locomoción muy efectivos mediante el uso de alas batientes que producen, al mismo tiempo, sustentación y empuje a partir de movimientos complejos relativos a sus trayectorias de vuelo. Mientras que un aeroplano convencional posee una hélice (o turbina) para originar empuje y alas fijas para generar sustentación, las alas de estas criaturas voladoras producen simultáneamente estas dos acciones.

Algunos resultados experimentales muestran que ciertos insectos producen hasta dos y tres veces más sustentación que la predicha por métodos de la aerodinámica estacionaria convencional. Algunos de estos mecanismos, como por ejemplo el retraso de la pérdida dinámica, la circulación adicional generada por la rotación del ala y la captura de la estela, entre otros, ofrecen ventajas únicas respecto de los bien conocidos vehículos aéreos de alas fijas.

En este trabajo se presentan modelos numéricos alas batientes desarrollados para estudiar la cinemática de insectos y aves pequeñas en diferentes configuraciones de vuelo. Las modificaciones en la cinemática se consideran como “el mecanismo” de modificación de modos de vuelo y como “el instrumento” de generación de maniobras. Para llevar a cabo un estudio integral de los distintos parámetros cinemáticos involucrados en cada ciclo de batimiento se desarrolló un código computacional que permite simular en forma interactiva las trayectorias, velocidades y aceleraciones de diferentes puntos contenidos en el ala. En este esfuerzo se presenta, también, un modelo estructural simplificado del mecanismo de batimiento del ala de un colibrí.

Palabras Claves: alas batientes, cinemática, micro-vehículos aéreos, inspiración en la biología.

1. INTRODUCCIÓN

Los insectos y las aves han desarrollado capacidades de vuelo mediante el uso de alas batientes que producen, simultáneamente, sustentación y empuje. Esta capacidad de producir fuerzas aerodinámicas no depende exclusivamente de las características morfológicas de las alas. Por el contrario, el vuelo de los animales es posible gracias al movimiento rítmico del batimiento de sus alas. Para soportar el peso del cuerpo y para controlar la altitud son necesarias fuerzas verticales; para generar propulsión hacia delante se necesita un empuje neto. Alteraciones sutiles en el movimiento de batimiento de las alas interrumpen transitoriamente este balance y permiten a la criatura voladora alterar la velocidad y la trayectoria del vuelo.

Desde el punto de vista energético el vuelo es muy costoso, y el gasto de energía mecánica es altamente influenciado por la morfología de las alas y del cuerpo, la cinemática del movimiento del batimiento, y los patrones de movimiento del cuerpo en el espacio tridimensional. La diversidad morfológica de los insectos alados está en íntima correspondencia con la diversidad en la cinemática del movimiento del cuerpo y de las alas. Aunque mucho menos estudiados que la diversidad morfológica, estos movimientos en gran medida determinan la variación temporal de los patrones de generación de fuerzas aerodinámicas y el gasto de energía durante el vuelo. Por lo tanto, para realizar un correcto análisis de la biomecánica y de la performance del vuelo animal es necesario llevar a cabo una detallada descripción de la cinemática del batimiento de las alas y de los patrones de movimiento del cuerpo del insecto alado.

El mecanismo fundamental del batimiento de las ala fue descrito por primera vez por Osborne [1], quien introdujo el concepto de plano de batimiento (stroke plane). Este es el plano virtual que contiene el ala durante su movimiento periódico de batimiento. El ciclo de batimiento puede ser dividido en dos fases: (i) una primera etapa donde el ala realiza un movimiento descendente desde la parte dorsal hacia el vientre del insecto, llamada "downstroke"; y (ii) una segunda etapa donde el ala se mueve en una dirección opuesta, desde el vientre hacia la parte dorsal, llamada "upstroke" [2]. Hacia el final del downstroke y del upstroke el ala gira rápidamente e invierte su dirección de movimiento, lo cual puede ser clasificado como la porción rotacional del ciclo de batimiento. El giro realizado cuando el ala cambia de la fase downstroke a la de upstroke es llamado "pronation" y cuando el ala cambia de la fase de upstroke a la de downstroke es llamado "supination" (ver Figura 1). Cada medio ciclo de aleteo, ya sea downstroke o upstroke, se denomina "half-stroke" [3].

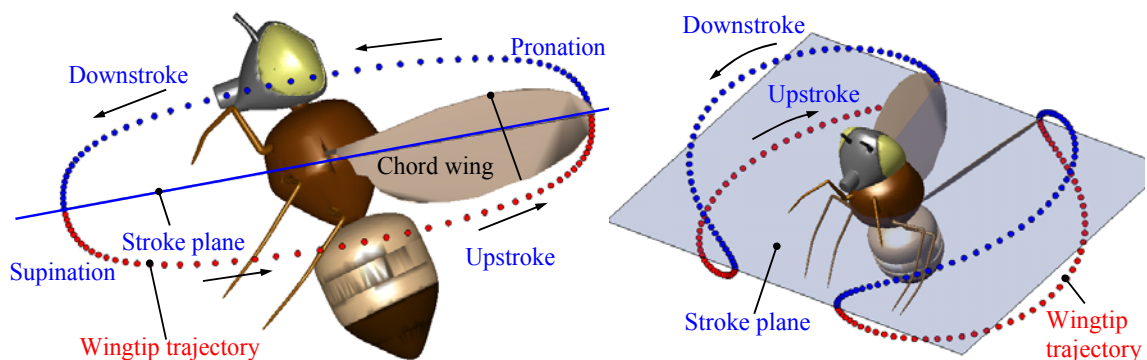


Figura 1 Fases de un ciclo de batimiento.

2. DESCRIPCIÓN DEL MODELO

En ausencia de deformaciones elásticas, la cinemática del ala se puede describir especificando la evolución temporal de tres ángulos: *i)* el ángulo que orienta el ala respecto del plano de batimiento, “stroke position”, $\phi(t)$; *ii)* el ángulo de desviación respecto del plano de batimiento, “stroke deviation”, $\theta(t)$; y *iii)* el ángulo de rotación respecto del eje longitudinal del ala, $\psi(t)$, (ver Figura 2). La descripción completa de la cinemática, como así también la geometría del ala utilizada en este trabajo se puede encontrar en [4].

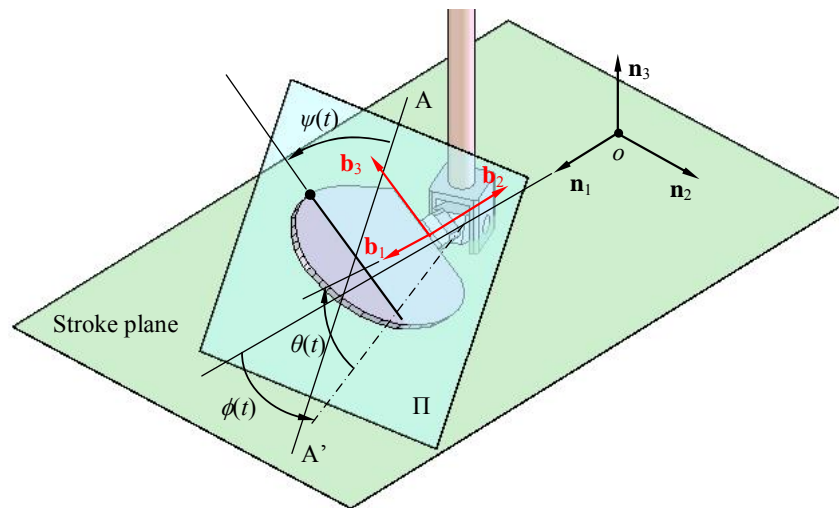


Figura 2 Definición de los ángulos que se utilizan para describir la cinemática del ala batiente.

3. PATRONES CINEMÁTICOS

En la literatura se han utilizado diferentes modelos cinemáticos para investigar las características aerodinámicas del vuelo de insectos. En este trabajo se utiliza una representación real de la cinemática de una mosca doméstica (*Drosophila Melanogaster*) que se muestra en la Figura 3, que fue medida y procesada por Lentink y publicada por Bos [5]. A partir de un conjunto discreto de puntos mostrados en la Figura 3-A se realizó un ajuste de mínimos cuadrados utilizando series de Fourier [6] para obtener las curvas de la Figura 3-B

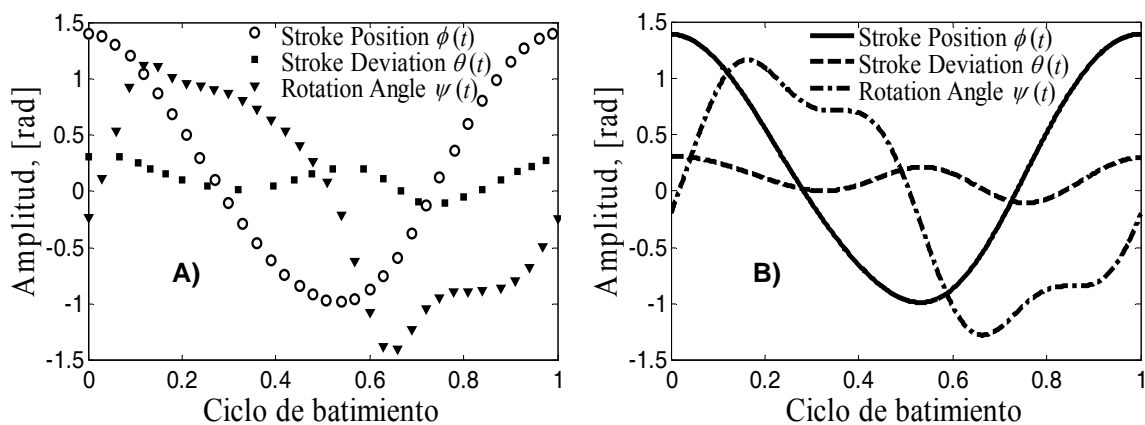


Figura 3 A) Conjunto de datos discretos, B) Ajuste mediante mínimos cuadrados.

4. SIMULACIONES NUMÉRICAS

El código computacional para llevar a cabo la simulación numérica de la cinemática de alas batientes fue desarrollado íntegramente en MATLAB®. Este software permite ingresar funciones en forma discreta para representar la evolución temporal de los ángulos ϕ , θ , y ψ . El programa cuenta con una rutina de pre-procesamiento que interpola los datos discretos. Luego, los datos interpolados son utilizados para computar la orientación espacial del ala, y la velocidad y aceleración de distintos puntos contenidos en la misma.

El post-procesamiento de los datos permite obtener: *i*) visualizaciones de las trayectorias que siguen las alas a lo largo de un ciclo de batimiento, *ii*) proyecciones 2D de las trayectorias 3D que describen puntos distribuidos sobre la cuerda y la envergadura del ala (ver Figura 4), como así también, *iii*) gráficos de la velocidad y aceleración de dichos puntos.

La validación del código fue realizada ingresando la cinemática implementada por Dickinson [7] sobre un robot dinámicamente escalado (*Robofly*). En la referencia [4] se reportan trayectorias 3-D de puntos materiales contenidos en el ala cuyas proyecciones bidimensionales reproducen fielmente los resultados experimentales logrados por Dickinson.

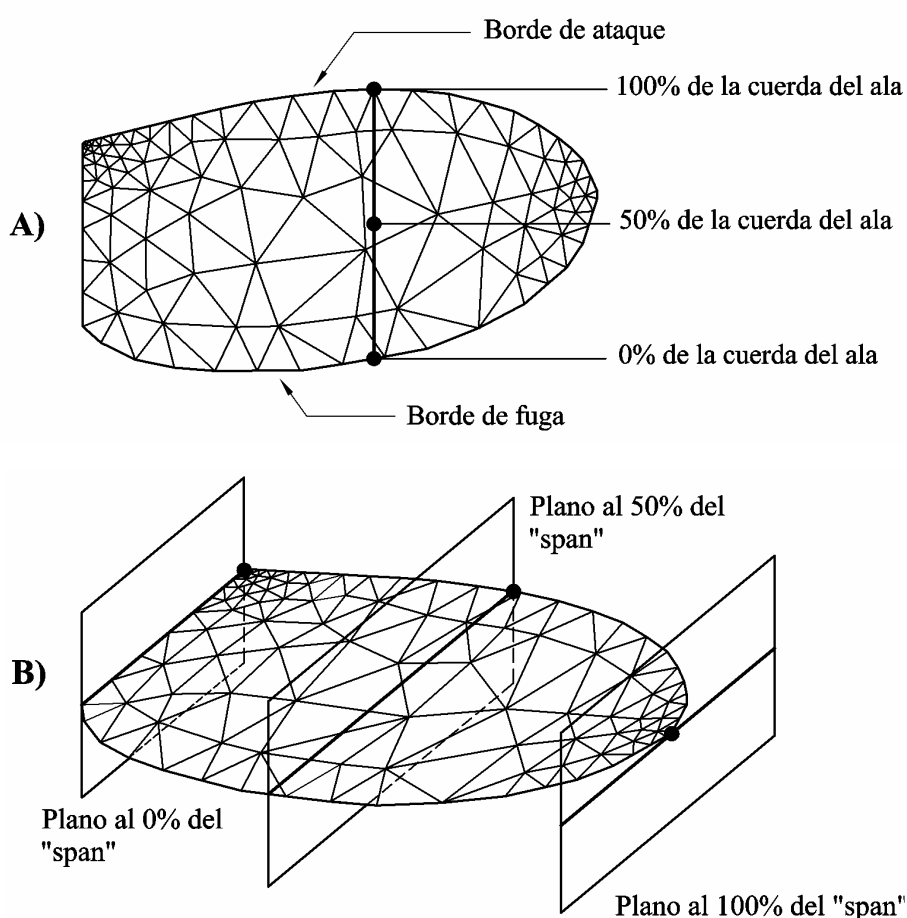


Figura 4 Discretización del ala: A) Puntos sobre la sección de mayor cuerda al 0, 50, y 100 % de la cuerda, B) Puntos sobre el borde de ataque al 0, 50, y 100 % de la envergadura (span).

4.1 Proyecciones 2-D de las trayectorias de puntos ubicados sobre la cuerda máxima del ala

En esta sección se presentan las proyecciones sobre los planos X-Z e Y-Z de las trayectorias 3D de puntos materiales ubicados al 0, 50, y 100 % de la cuerda del ala en la sección de mayor cuerda (ver Figura 4-A). Los círculos llenos de la Figura 5 corresponden a la fase de downstroke, y los círculos vacíos a la fase de upstroke. Las rectas con origen en estos puntos están contenidas en el plano del ala y se incluyen para visualizar la orientación de la correspondiente sección alar en cada instante de tiempo.

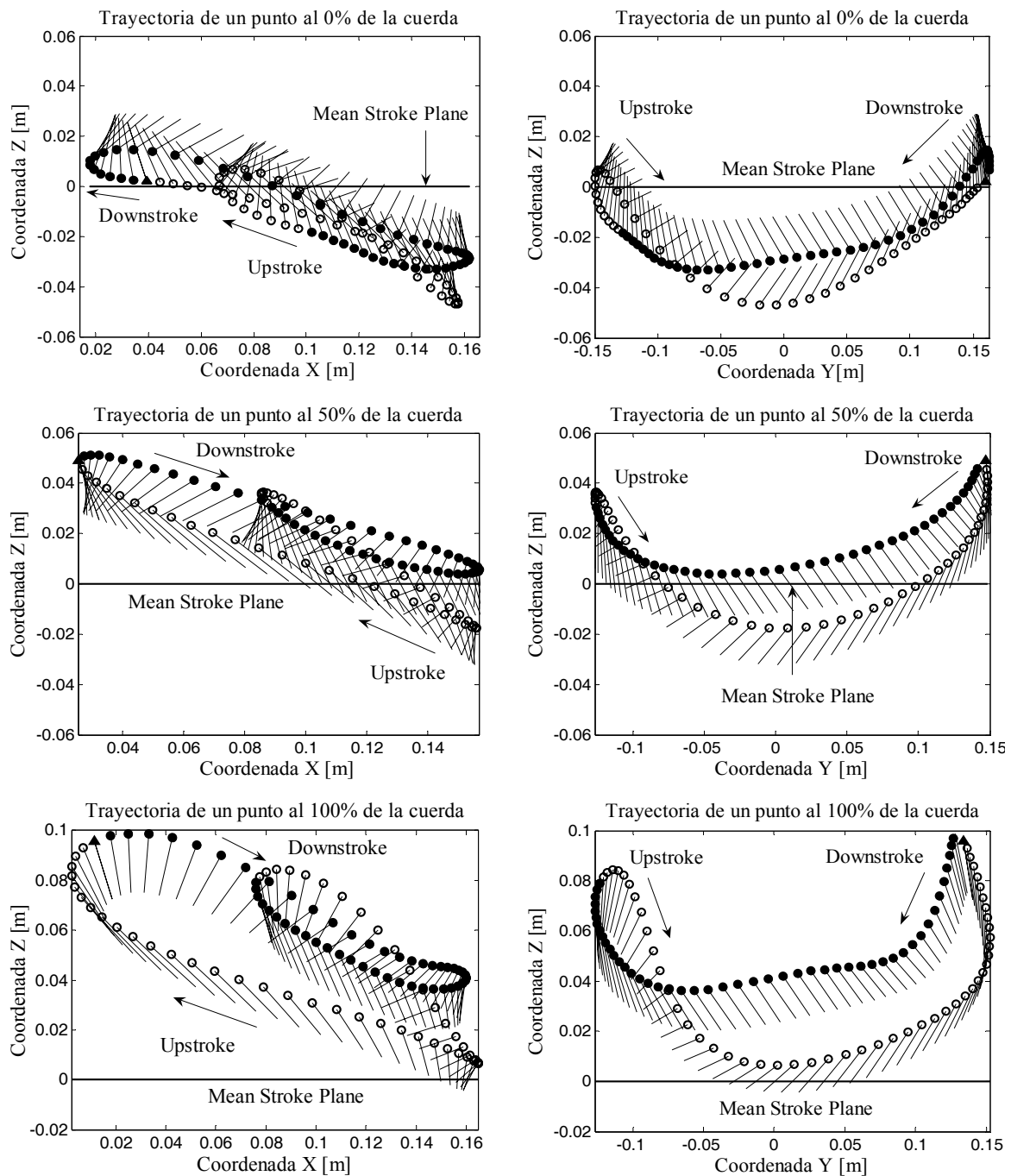


Figura 5 Proyecciones 2-D de trayectorias de puntos al 0, 50, y 100 % de la cuerda del ala.

4.2 Proyecciones 2-D de las trayectorias de puntos ubicados sobre el borde de ataque

En esta sección se presentan proyecciones bidimensionales de las trayectorias 3D de puntos sobre el borde de ataque distribuidos al 0, 50, y 100 % de la envergadura del ala (ver Figura 4-B). La Figura 6 muestra la compleja cinemática asociada a los diferentes puntos contenidos en el ala.

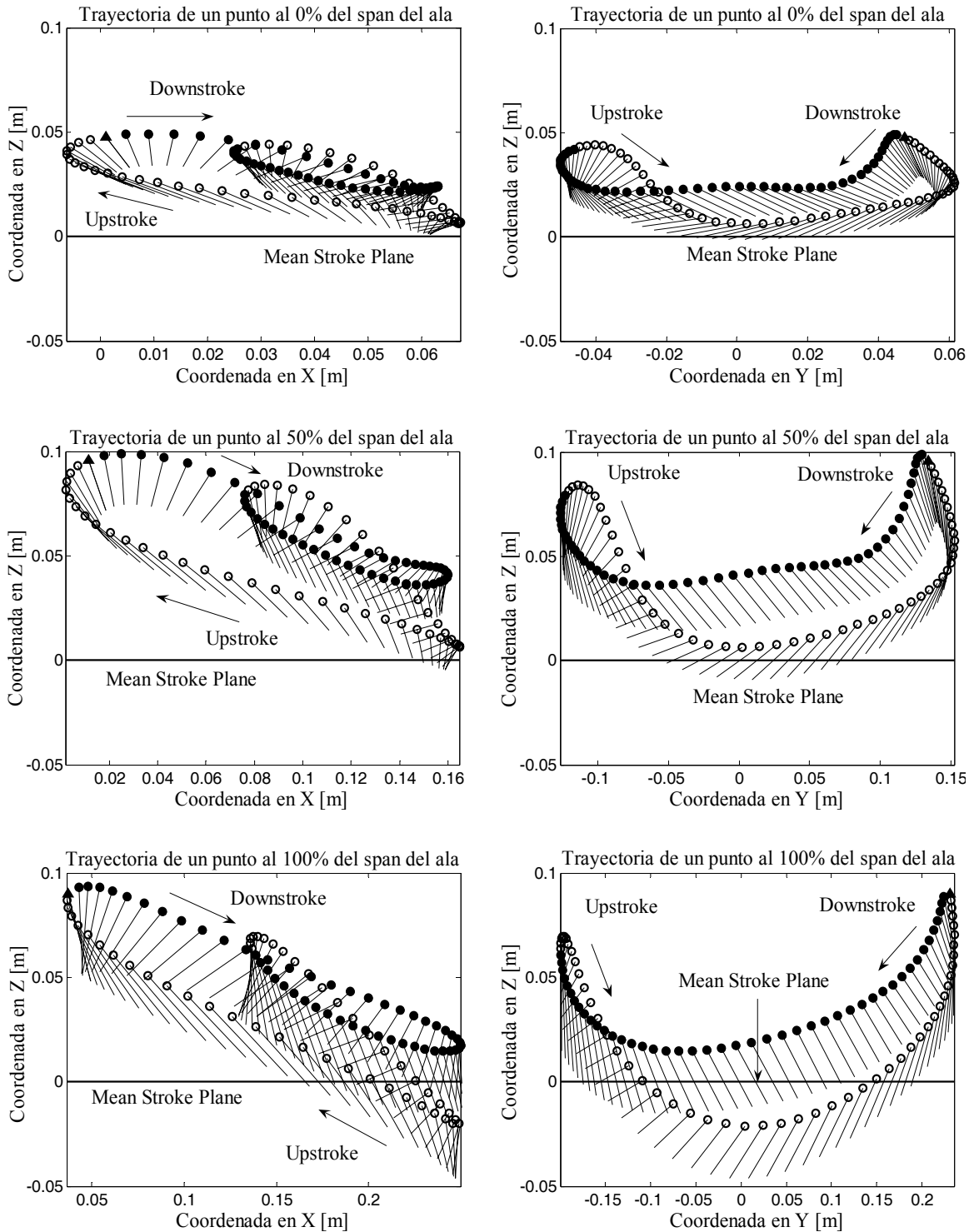


Figura 6 Proyecciones 2-D de trayectorias de puntos al 0, 50, y 100 % de la envergadura del ala.

Este patrón en forma de ocho ha sido confirmado por varios investigadores a lo largo de décadas de trabajo. En el análisis realizado en este esfuerzo el plano de aleteo permanece en una posición horizontal fija en el espacio, lo cual implica que el tipo de vuelo analizado corresponde a una clase de "hover". Este tipo de vuelo fue extensivamente estudiado por Weis-Fogh [8, 9] quien caracterizó los patrones normales de "hover".

La protuberancia extra (bump) en el ángulo de rotación en el comienzo tanto del downstroke como en el upstroke causa una disminución en la amplitud del ángulo de ataque lo cual implica que la orientación del ala es casi horizontal, esto origina un marcado decremento en las fuerzas de arrastre sobre el ala, mejorando de esta manera la performance aerodinámica del insecto.

4.3 Velocidad y aceleración de la punta del ala

El programa desarrollado cuenta con una rutina que determina en forma numérica la velocidad y aceleración de los diferentes puntos analizados en las secciones 4.1 y 4.2. En la Figura 7 se grafica el módulo de la velocidad y el módulo de la aceleración de la punta del ala.

Los cambios bruscos en la velocidad y aceleración que se observan en la Figura 7 hacia el final de cada half-stroke (donde el ala cambia rápidamente su dirección de movimiento) tienen una gran influencia sobre las fuerzas de sustentación producidas por la rotación del ala respecto de su eje longitudinal (rotational lift) [2] y sobre las fuerzas generadas debido a la captura de la estela (wake capture).

Estos mecanismos aerodinámicos inestacionarios dependen explícitamente de la fase rotacional del ciclo de batimiento (pronation y supination) e interactúan con mecanismos tales como el retraso de la pérdida dinámica (delayed stall) que depende básicamente de la fase de traslación del ala. Por otro lado, es de vital importancia conocer las trayectorias, velocidades y aceleraciones de diferentes puntos materiales pertenecientes al ala para intentar efectuar un correcto análisis dinámico y aerodinámico del problema.

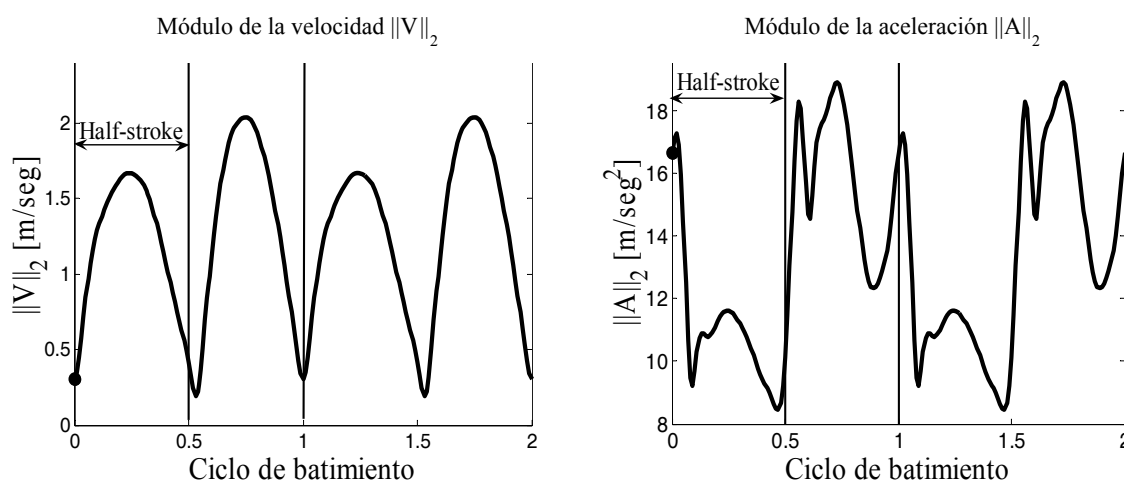


Figura 7 Módulo de la velocidad y de la aceleración de la punta del ala.

5. CONCLUSIONES

En este trabajo se desarrolló un módulo de interpolación auto contenido que fue acoplado con éxito a un código computacional previamente elaborado. El carácter interactivo del código en general posibilita ingresar diferentes patrones cinemáticos que permiten llevar a cabo un análisis integral de la mecánica del vuelo natural, como así también, estudiar diferentes configuraciones observadas en el vuelo de pájaros pequeños e insectos: despegue, ascenso, hover, descenso y aterrizaje, entre otras.

En el futuro se incorporará al programa la cinemática de aves pequeñas dotando a las alas de características elásticas para poder estudiar como las deformaciones del perfil del ala (torsión, flexión transversal, y expansión y contracción de la superficie alar) influyen sobre la producción de fuerzas aerodinámicas.

6. REFERENCIAS

- [1] M. F. Osborne, Aerodynamics of Flapping Flight With Application to Insects. *Journal of Experimental Biology*, **28**:221-245, 1951.
- [2] M. H. Dickinson, F. O. Lehmann, S. P. Sane, Wing Rotation and the Aerodynamic Basis of Insect Flight. *Science*, **284**:1954-1960, 1999.
- [3] J. M. Zanker, The Wing Beat of *Drosophila Melanogaster*. I. Kinematics. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, **327**(1238):1-18, 1990.
- [4] B. A. Roccia, S. Preidikman, J. C. Massa, Desarrollo de un Código Computacional para Simular y Analizar la Cinemática de Alas Batientes. *Revista Mecánica Computacional*, **26**:3224-3245, 2007.
- [5] F. M. Bos, D. Lentink, B. W. van Oudheusden, H. Bijl, Numerical Study of Kinematic Wing Models of Hovering Insect Flight. *45th AIAA Aerospace Sciences Meeting*, pp. 1-18, 2007.
- [6] S. C. Chapra, R. P. Canale, *Numerical Methods for Engineers*. McGraw-Hill, 1988.
- [7] S. P. Sane, M. Dickinson, The Control of Flight Force by a Flapping Wing: Lift and Drag Production. *The Journal of Experimental Biology*, **204**:2607-2626, 2001.
- [8] T. Weis-Fogh, Energetics of Hovering Flight in Hummingbirds and in *Drosophila*. *Journal of Experimental Biology*, **56**:79-104, 1972.
- [9] T. Weis-Fogh, Quick Estimates of Flight Fitness in Hovering Animals, Including Novel Mechanisms for Lift Production. *Journal of Experimental Biology*, **59**:169-230, 1973.