

Flujos 2-d inestacionarios, levemente viscosos y dominados por vorticidad: desarrollo de un modelo aerodinámico

Sergio Preidikman^(1,2), Marcelo F. Valdez⁽¹⁾, y Julio C. Massa^(1,2)

⁽¹⁾ *Departamento de Estructuras, Facultad de C. E. F. y N., Universidad Nacional de Córdoba, Casilla de Correo 916, (5000) Córdoba, Argentina. e-mail: jmassa@efn.uncor.edu*

⁽²⁾ *Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Río Cuarto, Ruta Nacional 36 Km. 601, 5800 Río Cuarto, Argentina. e-mail: spreidikman@ing.unrc.edu.ar*

RESUMEN

La comprobación experimental de la importancia de los fenómenos inestacionarios en el vuelo de los insectos ha promovido el desarrollo de mejores herramientas computacionales y experimentales para investigar las fuerzas inestacionarias provenientes de flujos vorticosos alrededor de un ala batiente. En particular se han desarrollado robots dinámicamente escalados para realizar mediciones controladas del flujo y las fuerzas.

El fin último de este trabajo es el desarrollo de una herramienta numérica que permita evaluar las cargas aerodinámicas asociadas a los diversos mecanismos empleados por algunos insectos para mantenerse en vuelo, con el objeto de inspirar el desarrollo de micro-vehículos aéreos súper-maniovrables, no tripulados de alas batientes.

Estos mecanismos de vuelo son inherentemente no-lineales e inestacionarios y no pueden ser captados por una formulación basada en las hipótesis de la aerodinámica lineal y estacionaria. Se considera que el número de Reynolds es suficientemente alto como para avalar la hipótesis de que los efectos viscosos están confinados, únicamente, a la capa límite y a las estelas vorticosas. Esta última hipótesis permite predecir las cargas aerodinámicas mediante el uso del método de red de vórtices no-lineal e inestacionario.

El modelo aerodinámico desarrollado incluye la posibilidad de separación del flujo en el borde de ataque cuando el perfil alcanza un determinado ángulo de ataque efectivo y permite además incorporar variaciones, preestablecidas en el tiempo, de la combadura y de la cuerda de la sección alar en estudio. Para cotejar los resultados de las simulaciones numéricas con resultados experimentales se desarrolló un algoritmo de preprocesamiento de datos, y otro de visualización y post-procesamiento de las variables que caracterizan la evolución espacial y temporal del flujo. Se estudian, entre otras, las características del vuelo conocido como "hover", en el cual el insecto se mantiene suspendido en el aire, aleteando y sin avanzar.

Palabras Claves: flujos potenciales inestacionarios, vorticidad, micro-vehículos aéreos.

1. INTRODUCCIÓN

En la naturaleza, todas las criaturas capaces de mantenerse en vuelo poseen alas batientes. Esto puede atribuirse en parte a las restricciones impuestas por el uso de músculos. Dicha restricción es de origen biológico y no necesariamente afecta a los micro-vehículos aéreos fabricados por el hombre. Sin embargo, existe evidencia que a pequeñas escalas, los efectos aerodinámicos no estacionarios producidos por las alas en batimiento ofrecen ventajas únicas respecto de las alas y rotores convencionales [1]. Entre estas ventajas se encuentra la generación de sustentación y empuje, manteniendo una economía en el peso.

Dada la complejidad de un modelo en tres dimensiones, es interesante investigar si un modelo sencillo bidimensional provee resultados consistentes con los obtenidos en los experimentos. Obviamente, un modelo en dos dimensiones no puede predecir los fenómenos inherentemente tridimensionales, como ser el flujo axial que estabiliza el vórtice desprendido del borde de ataque; pero por otro lado, resulta difícil evaluar la importancia de estos fenómenos tridimensionales sin conocer lo que ocurre en dos dimensiones.

Los insectos fueron los primeros animales en desarrollar el vuelo activo y además, llevan ventaja en cuanto a performance aerodinámica y maniobrabilidad. El mayor interrogante, sin embargo, es cómo las alas batientes pueden generar las fuerzas necesarias para propulsar y mantener en el aire a un insecto. Los sistemas de referencia empleados para estudiar el movimiento del ala de insectos se muestran en la Figura 1.

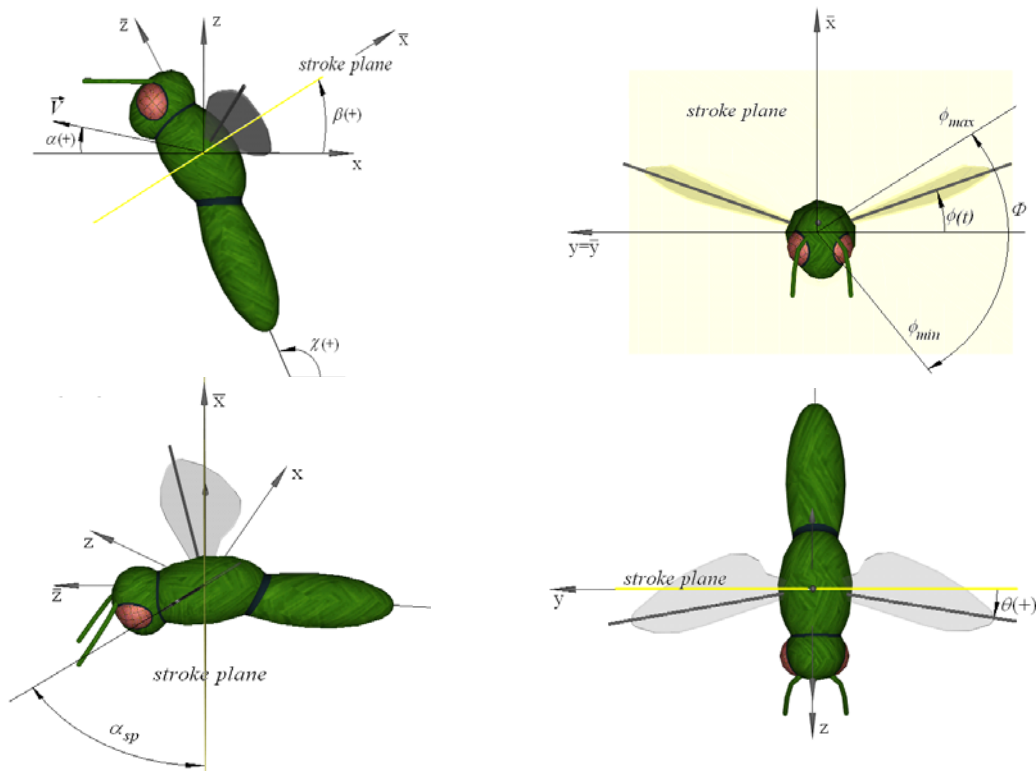


Figura 1 Sistemas de referencia: (x, y, z) fijo al cuerpo del insecto y $(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z})$ fijo al plano de aleteo.

Como se ha demostrado en numerosas investigaciones, los insectos se sirven de mecanismos inherentemente inestacionarios y no-lineales para la producción de la fuerza sustentadora, los cuales no pueden ser captados por la teoría aerodinámica lineal y estacionaria. Entre estos mecanismos, pueden mencionarse la captura de estela, la sustentación rotacional y el retraso de la pérdida aerodinámica.

En el presente trabajo se desarrolla un modelo numérico bi-dimensional para simular el movimiento de batimiento de una sección alar. Además, se desarrollan algoritmos de post-procesamiento que permiten llevar a cabo visualizaciones de las estelas y de los campos de velocidades. Si bien, el número de Reynolds que caracteriza el flujo real en los insectos es relativamente bajo, puede considerarse que tiene un valor lo suficiente alto como para asumir que los efectos viscosos están confinados, únicamente, a la capa límite y las estelas. Este hecho permite utilizar un modelo basado en el método de red de vórtices inestacionario y no lineal (unsteady vortex lattice method). Para la evaluación de las cargas aerodinámicas se emplea la versión inestacionaria de la ecuación de Bernoulli.

2. EL MODELO AERODINÁMICO

Se restringe toda la vorticidad del flujo a la capa límite y a sus estelas, y el flujo se considera irrotacional fuera de estas regiones. Estas hipótesis permiten predecir las cargas aerodinámicas mediante el uso del método de red de vórtices no-lineal e inestacionario. El modelo aerodinámico desarrollado incluye la posibilidad de separación del flujo en el borde de ataque cuando el perfil alcanza un determinado ángulo de ataque efectivo y permite además incorporar variaciones, preestablecidas en el tiempo, de la combadura y de la cuerda de la sección alar en estudio. El perfil es muy delgado, una única sábana vorticiosa adherida representa a la capa límite en ambas superficies del mismo.

Esta sábana vorticiosa se discretiza con una red de vórtices como se muestra en la Figura 2. Cada elemento posee un vórtice y un punto de control ubicados a $\frac{1}{4}$ y a $\frac{3}{4}$, respectivamente, de la longitud del mismo. Las estelas del borde de ataque y de fuga se modelan también como sábanas vorticosas libres, que a su vez se discretizan por vórtices puntuales. Estas últimas pueden estirarse y enrollarse libremente hasta lograr configuraciones libres de fuerzas.

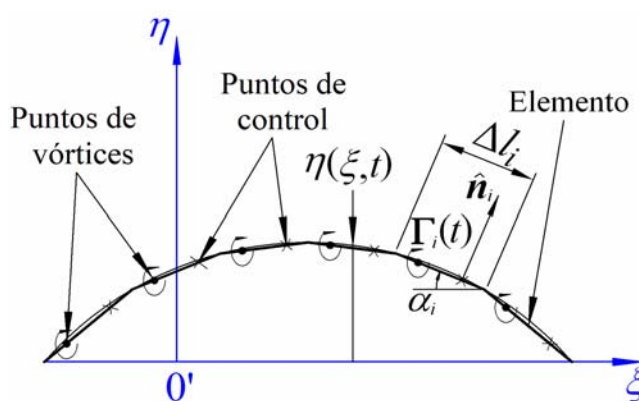


Figura 2 Discretización de la sábana vorticiosa adherida al perfil.

3. FORMULACIÓN Y SOLUCIÓN NUMÉRICA DEL PROBLEMA

La ecuación que gobierna el problema es la ecuación de continuidad para flujos incompresibles, complementada con las condiciones de contorno de “no-penetración” y de regularidad en el infinito.

La imposición de la condición de no-penetración en un número finito de puntos de control deriva en un sistema de ecuaciones algebraicas lineales. Resolviendo este sistema se obtienen las circulaciones de los vórtices asociados a cada elemento. La diferencia de presiones en cada elemento, en cada instante de tiempo, se obtiene a partir de la ecuación de Bernoulli inestacionaria.

Un proceso de convección de vorticidad genera las estelas. Los vórtices que conforman las estelas se mueven, en cada paso de cálculo, con las velocidades locales de las partículas de fluido. Esto asegura que las estelas están “libres” de diferencias de presiones, esto es, no son superficies sustentadoras. Todos los detalles de la formulación y su implementación computacional se han omitido en este trabajo por razones de espacio pero pueden consultarse en [2].

3.1 Campo de movimiento, campo de presiones y visualización de partículas

Con el objeto de representar el campo de movimiento y de presiones, se genera una grilla Euleriana cuya dimensión es fija en el tiempo y es tal que encierra, durante el período de tiempo en que se lleva a cabo la simulación numérica, al perfil y a sus estelas. La densidad de la grilla es definida por el usuario. El campo de movimiento en cada instante se obtiene calculando la velocidad local, en cada nudo de la grilla, mediante el uso de la ley de Biot y Savart. Visualizaciones de este tipo se muestran en la Figura 8. El campo de presiones en todo el dominio fluido se obtiene por un procedimiento desarrollado por los autores cuyos detalles pueden verse en [2]. Visualizaciones de este tipo se muestran en la Figura 10.

Una alternativa interesante que presenta la herramienta computacional desarrollada es la de introducir en $t=0$, una gran cantidad de partículas cuya densidad en las direcciones “X” y “Z” es definida por el usuario. Luego, en cada instante, siguiendo el mismo procedimiento empleado para obtener el campo de movimiento, se calcula la velocidad de cada partícula, la cual multiplicada por el intervalo de tiempo Δt genera un vector desplazamiento que permite actualizar la posición de las mismas. Debido a que las partículas bajo observación son siempre las mismas, se puede evidenciar con estas visualizaciones la deformación del volumen fluido producto del movimiento de la sección alar. Este tipo de visualizaciones se muestran en la Figura 9.

4. RESULTADOS

A continuación se presentan algunos resultados obtenidos con la herramienta computacional presentada en este trabajo y el contraste entre los resultados numéricos obtenidos con los correspondientes a mediciones experimentales.

4.1 Ejemplo 1: Perfil indeformable

Se analiza a una placa plana realizando un movimiento de traslación alternativo combinado con una rotación alrededor de su eje, en fase con la traslación. Los resultados numéricos obtenidos se contrastan con las mediciones experimentales presentadas en [3], obtenidas mediante un robot dinámicamente escalado que realiza el movimiento mencionado. A través de sensores bidimensionales se midieron las componentes normal y tangente a la planta alar de la fuerza aerodinámica. El robot tiene la forma de la planta alar de la mosca "Drosophila". Mayores detalles sobre el experimento pueden obtenerse en [3] y [4].

El movimiento del perfil, para nuestro análisis bidimensional, está dado por la Ec. (1):

$$X(t) = 1,4 \cos(2\pi n t) \quad \alpha_{sp}(t) = \frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{2} \sin(2\pi n t) \quad \text{donde: } n = 0,25 \quad (1)$$

donde $X(t)$ es la coordenada global del centro de rotación del perfil, $\alpha_{sp}(t)$ es el ángulo de rotación medido con respecto al eje horizontal, n es la frecuencia de aleteo.

Para el cálculo de los coeficientes aerodinámicos el programa se corrió una cantidad de pasos equivalentes a 4 ciclos completos de aleteo. Para la comparación de los resultados se empleó la adimensionalización propuesta por Wang [3], en la cual las fuerzas son normalizadas con respecto a la máxima fuerza cuasi-estacionaria obtenida en los 4 ciclos. Esta normalización se indica en la Ec. (2):

$$C_l = \frac{l_c}{l_{qsmax}} \quad C_d = \frac{d_c}{d_{qsmax}} \quad (2)$$

donde l_{qsmax} y d_{qsmax} son, la máxima sustentación y resistencia cuasi-estacionaria durante los cuatro ciclos, y l_c y d_c son las fuerzas calculadas en cada instante. En la Figura 3 se muestra, en trazos rojo y azul, los coeficientes aerodinámicos estacionarios obtenidos con la herramienta desarrollada en este trabajo para una placa plana moviéndose con velocidad constante y ángulo de ataque fijo, α . En trazos verde y negro, se presentan los valores de los mismos coeficientes obtenidos por el modelo de Wang [3].

La variación temporal de los coeficientes aerodinámicos calculados, contrastada con los resultados experimentales pueden observarse en la Figura 4. En ésta, el tiempo se adimensionaliza multiplicándolo por la frecuencia de aleteo, lo que implica que en $t=0$ comienza del "downstroke" y en $t=0.5$ comienza el "upstroke", repitiéndose esto en los ciclos sucesivos. En trazo rojo se muestran los resultados experimentales, en azul, los obtenidos con nuestra herramienta y en trazos verdes, las estimaciones de la teoría cuasi-estacionaria. Como se observa, los cálculos realizados con la herramienta computacional ajustan aceptablemente los resultados experimentales del C_l y del C_d . En el caso del C_d , sin embargo, los picos al inicio de cada "halfstroke" no son copiados fielmente por nuestro modelo numérico.

En la Figura 5 se muestra el vector fuerza resultante para distintas posiciones del perfil y en la Figura 6 se presentan los resultados experimentales obtenidos en [3]. De la comparación de los gráficos se advierte la buena representación conseguida usando la técnica aquí desarrollada.

La evolución espacial y temporal de las estelas puede observarse en la Figura 7, donde se

representa en rojo la estela separada del borde de ataque, y en azul la del borde de fuga. Allí puede observarse la captura de estela que se produce en los extremos del movimiento.

La Figura 8 muestra la evolución del campo de movimiento para dos ciclos completos. La grilla posee un total de 10000 nudos: 100 nudos en la dirección X y 100 nudos en Z. En esta figura puede observarse el fenómeno de la captura de estela cada vez que el perfil alcanza una posición extrema. También puede observarse como las nubes de vórtices son convectadas hacia abajo, lo que pone de manifiesto la generación de sustentación.

La Figura 9 muestra la visualización de partículas, antes mencionada, para dos ciclos completos de aleteo. Se colocaron en total de 62500 partículas: 250 en la dirección X y 250 en la dirección Z. El rasgo sobresaliente de esta figura es la deformación que sufre el volumen, asemejándose al flujo generado por una hélice convencional.

En la Figura 10 se puede apreciar la evolución temporal del campo de presiones en todo el dominio fluido.

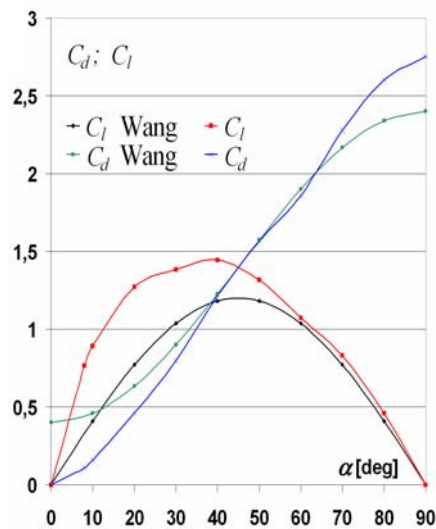


Figura 3 Coeficientes aerodinámicos estacionarios.

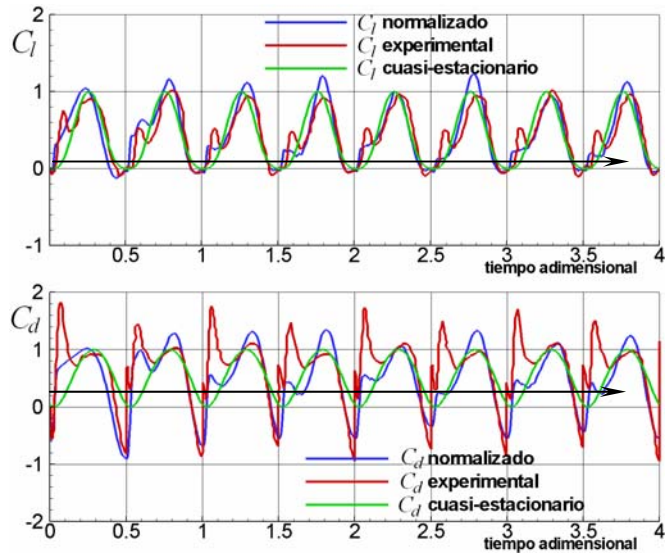


Figura 4 Coeficientes aerodinámicos inestacionarios.

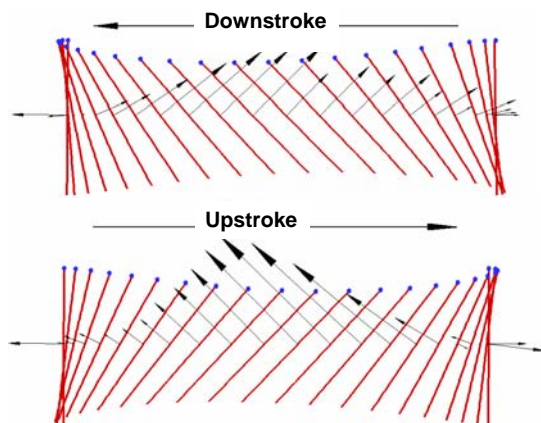


Figura 5 Perfil y fuerza resultante.

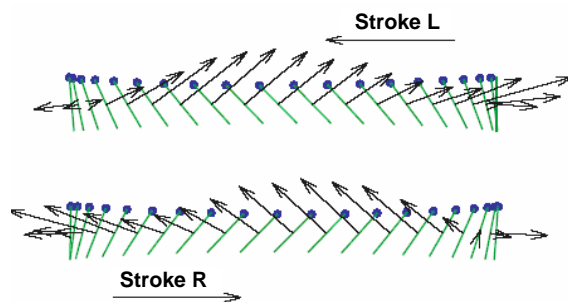


Figura 6 Resultados experimentales [3].

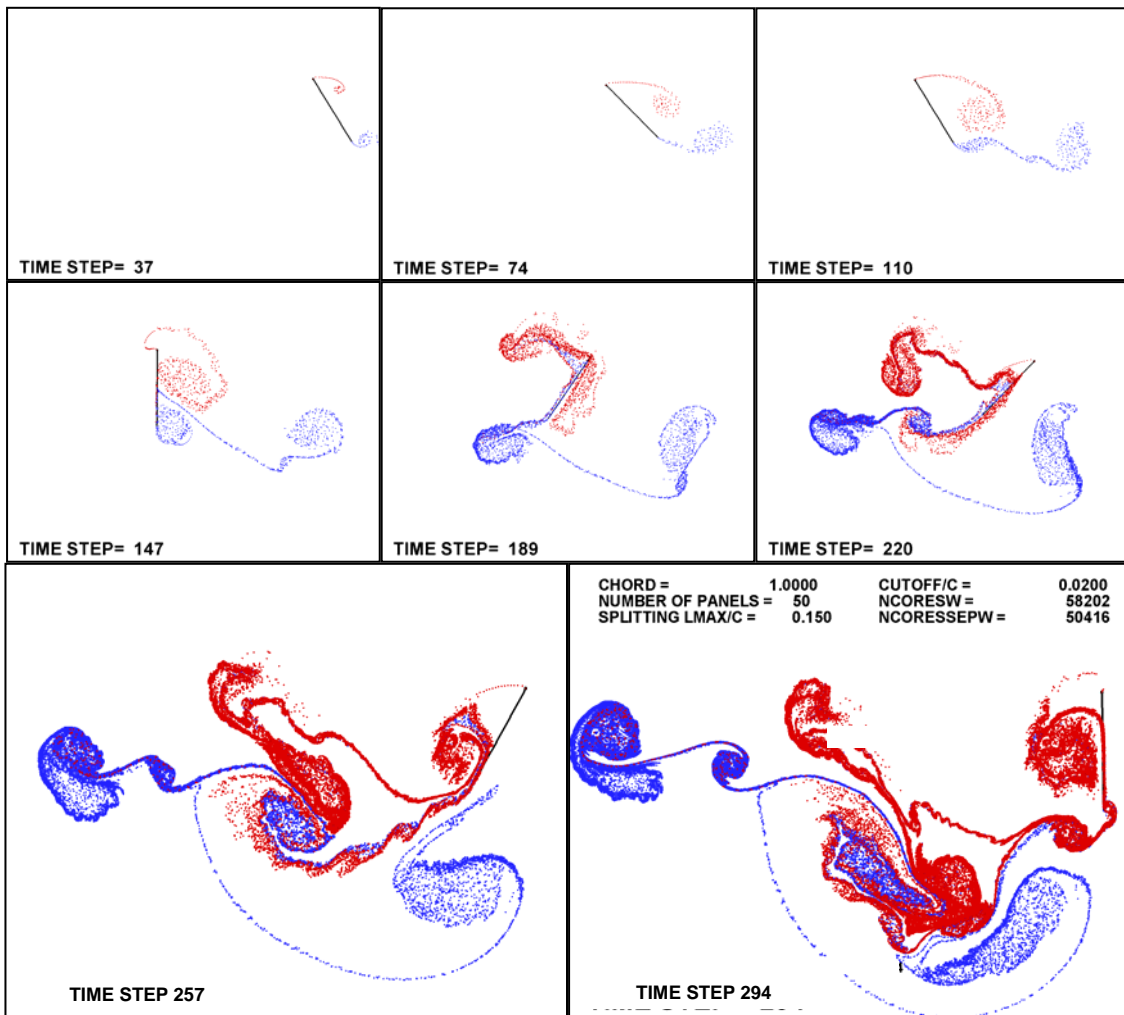


Figura 7 Evolución espacio-temporal de las estelas.

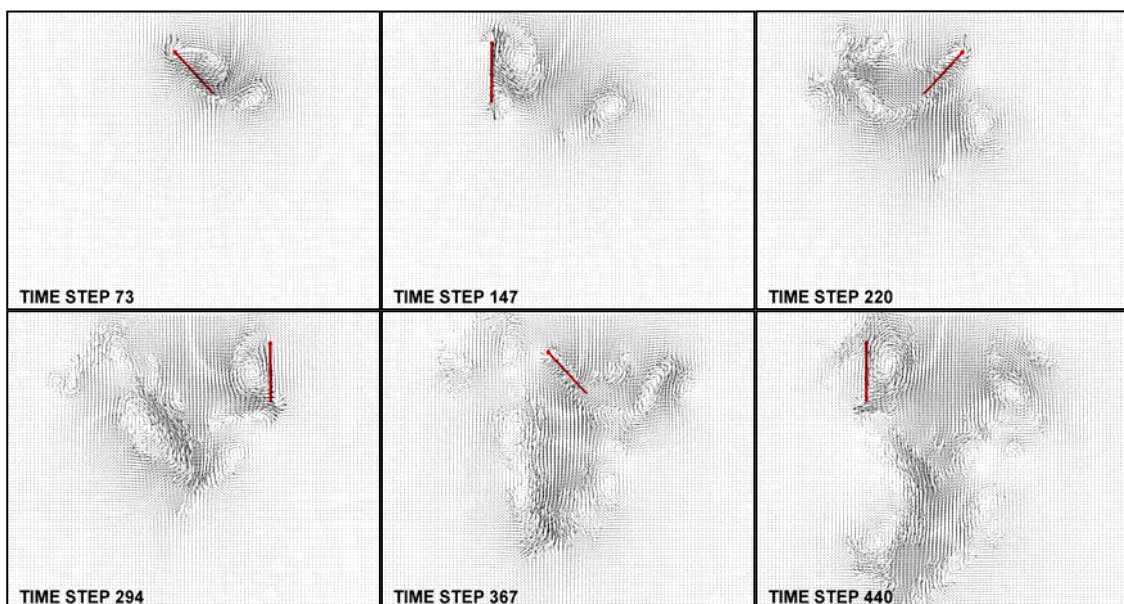


Figura 8 Evolución espacio-temporal del campo de velocidades.

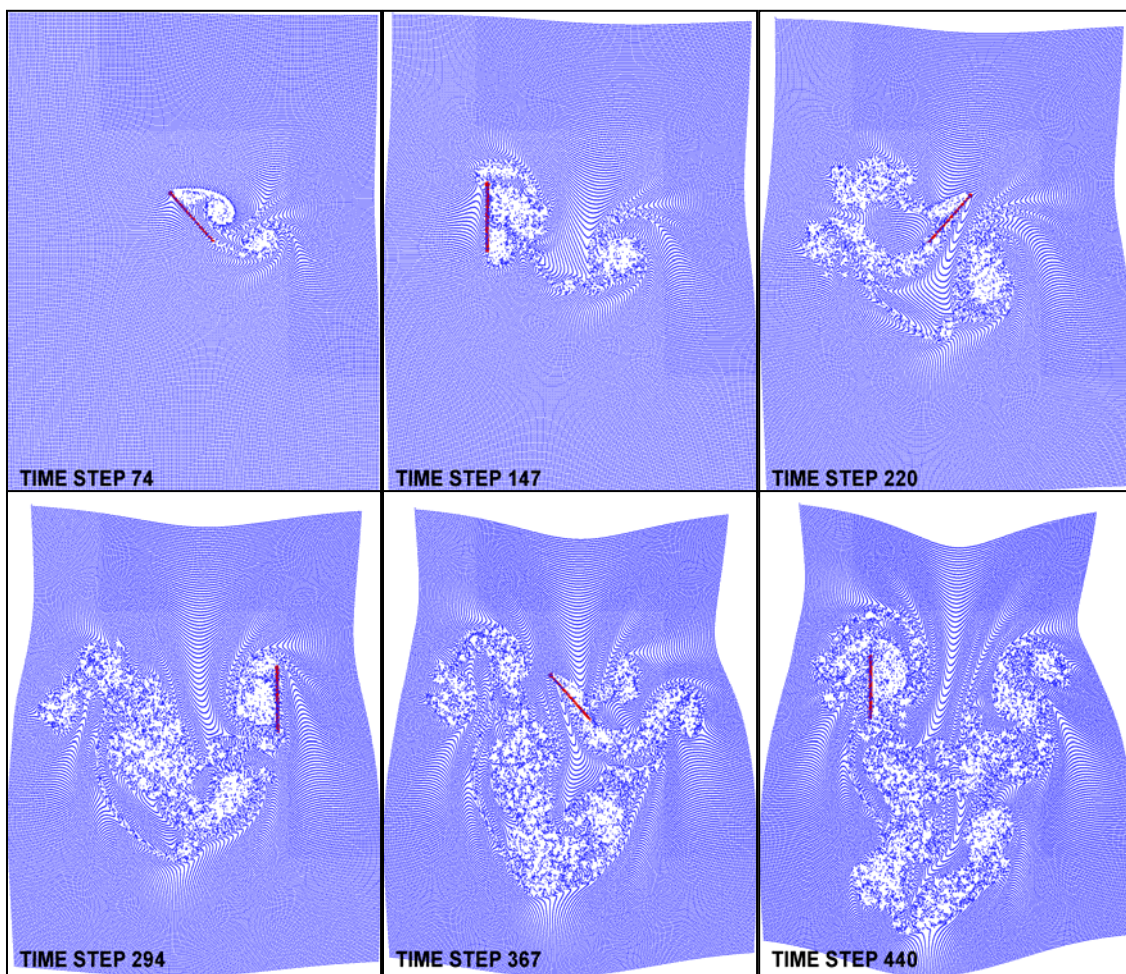


Figura 9 Visualización de partículas.

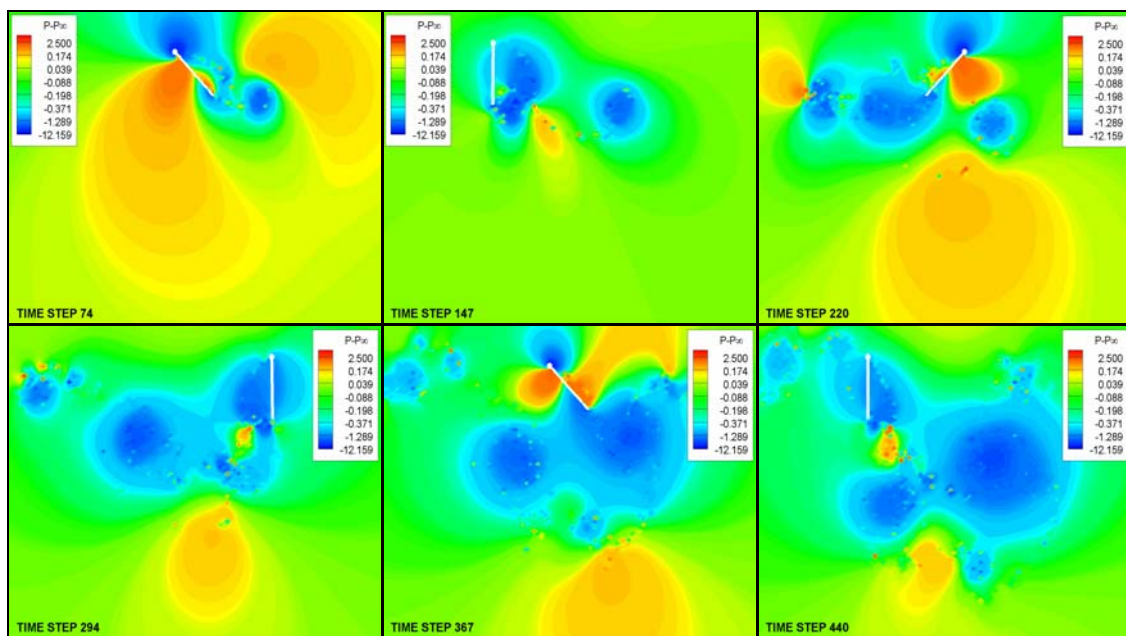


Figura 10 Evolución espacio-temporal del campo de presiones.

4.2 Ejemplo 2: Perfil deformable

En segundo lugar, para destacar aspectos cualitativos y para mostrar las opciones de la herramienta computacional, se presenta un caso con la misma cinemática analizada anteriormente, donde el perfil sufre una deformación prefijada tanto en su combadura como en la longitud de su cuerda. La cuerda sufre un acortamiento y alargamiento máximo del 15% de la cuerda media, que es unitaria, y la combadura instantánea varía entre el -15% y el 15%. La frecuencia de deformación (n_{def}) es 0.25 Hz.

En la Figura 11 se muestra la evolución temporal y espacial de las estelas.

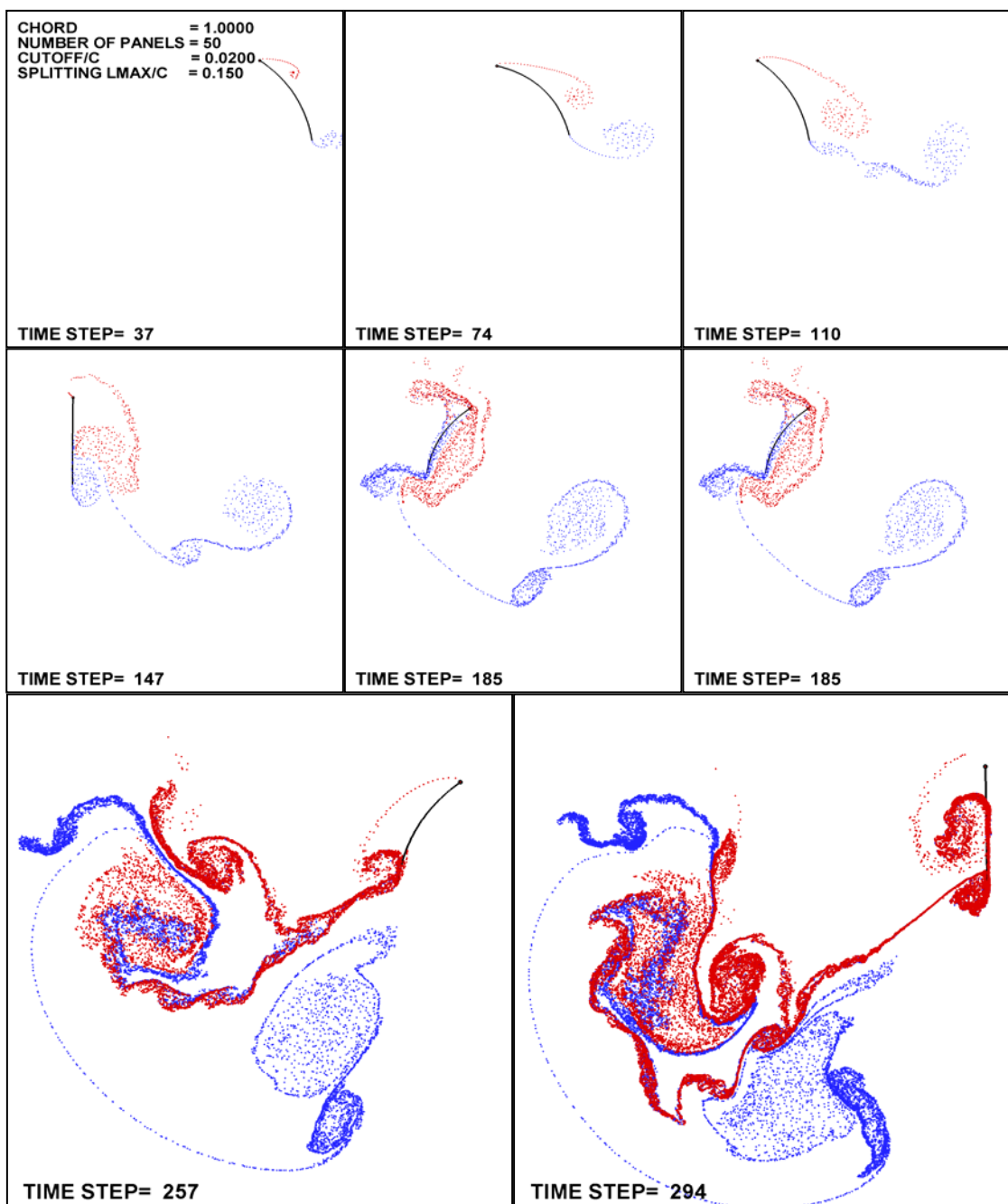


Figura 11 Evolución espacio-temporal de las estelas para un perfil deformable.

5. CONCLUSIONES

En el presente trabajo, se desarrolló una herramienta computacional muy versátil, basada en un modelo reducido bidimensional que emplea el método de red de vórtices inestacionario y no-lineal. Más allá de la valoración que merezca, sobre bases cuantitativas, la herramienta ha demostrado ser muy útil al momento de captar cualitativamente los mecanismos de vuelo inestacionarios que utilizan algunos insectos y aves pequeñas para propulsarse y mantenerse en el aire. Además, cuenta con una poderosa interfase visual que permite el mejor y más fácil entendimiento de estos mecanismos.

El contraste entre los resultados numéricos aquí obtenidos con los correspondientes a mediciones experimentales demostró las potencialidades del modelo desarrollado. Se extendió el alcance del mismo a: (i) casos en que el perfil alar tiene una forma arbitraria (por ejemplo, un perfil corrugado); y (ii) casos en que, además de los movimientos de aleteo, el perfil avanza en el medio fluido con una determinada velocidad, etc.

En lo que hace a los aspectos cuantitativos, debido a que no se ha realizado una “validación” exhaustiva del modelo, no es posible concluir sobre las bondades del mismo. Sin embargo, los resultados presentados en este trabajo son más que alentadores. Quizás las mayores diferencias encontradas con respecto a los resultados experimentales derivan del hecho de que en este esfuerzo se han despreciado completamente los efectos viscosos fuera de la capa límite y las estelas.

Si bien, el análisis es bidimensional, este modelo reducido constituye buen punto de partida para llegar a comprender de forma definitiva los mecanismos del vuelo de los insectos (que en realidad son tridimensionales), como así también para llevar a cabo simulaciones numéricas combinándolo con modelos de la dinámica estructural y con esquemas de control. Todo esto con el fin último de plasmar el desarrollo de micro-vehículos aéreos súper-maniobrables, no tripulados de alas batientes.

6. REFERENCIAS

- [1] C.P. Ellington, The Novel Aerodynamics of Insect Flight: Applications to Micro-Air Vehicles, *The Journal of Experimental Biology*, **202**:3439-3448, 1999.
- [2] M.F. Valdez, Análisis Aerodinámico de Flujos Bidimensionales e Inestacionarios Dominados por Vorticidad Aplicado a Micro-Vehículos Aéreos Inspirados en la Biología, Trabajo Final de grado, Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba, 2006.
- [3] Z. Wang, J.M. Birch, M.H. Dickinson, Unsteady Forces and Flows in Low Reynolds Number Hovering Flight: Two-dimensional Computations vs. Robotic Wing Experiments, *The Journal of Experimental Biology*, **207**:449-460, 2004.
- [4] M.H. Dickinson, F.O. Lehmann, S.P. Sane, Wing Rotation and the Aerodynamics Basics of Insects Flight, *Science*, **284**(5422):1954-1960, 1999.