



AERODINÁMICA INESTACIONARIA Y NO-LINEAL DE MICRO-VEHÍCULOS AÉREOS DE ALAS BATIENTES INSPIRADOS EN LA BIOLOGÍA

BRUNO A. ROCCIA^{1,2}, SERGIO PREIDIKMAN^{1,3}, JULIO C. MASSA¹

¹Departamento de Estructuras, Universidad Nacional de Córdoba
Casilla de Correo 916, 5000 Córdoba, Argentina

²Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Río Cuarto
Ruta Nacional 36, km 601, Río Cuarto, Córdoba, Argentina

³CONICET – Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas
Av. Rivadavia 1617, 1033 Buenos Aires, Argentina

(Recibido 25 de junio de 2011, para publicación 5 de agosto de 2011)

Resumen – En este trabajo se presenta el desarrollo de una herramienta de simulación numérica que permite estudiar la aerodinámica inestacionaria y no-lineal asociada al complejo movimiento de batimiento de las alas de insectos y aves pequeñas. El fin último de este esfuerzo es utilizar los resultados provenientes de este estudio para diseñar micro-vehículos aéreos de alas batientes inspirados en la biología. La cinemática del “vuelo natural” involucra, simultáneamente, movimientos hacia abajo y hacia arriba, rotaciones, oscilaciones y cambios significativos en el ángulo de ataque efectivo del ala. El modelo aerodinámico adoptado en este esfuerzo es una versión modificada de la versión 3D del *unsteady vortex lattice*, una generalización del conocido *vortex lattice method*, ampliamente utilizado en flujos incompresibles y estacionarios. El modelo permite tener en cuenta el comportamiento no-estacionario; las no-linealidades aerodinámicas asociadas con grandes ángulos de ataque y grandes desplazamientos producto del movimiento del eje longitudinal de cada ala; las deformaciones estáticas; y flujos dominados por vorticidad. En este trabajo se analiza la influencia del cuerpo del insecto en la generación de sustentación, para diferentes configuraciones de vuelo suspendido (*hover*), con y sin la presencia de una corriente de aire. La cinemática utilizada para prescribir el movimiento de las alas fue la desarrollada por Dickinson para mover un robot dinámicamente escalado (Robofly). La combinación del modelo cinemático con el modelo aerodinámico, junto con un pre-procesador para generar en forma paramétrica la geometría del insecto (cuerpo y alas) conforman una herramienta computacional que permite, entre otras: utilizar diferentes cinemáticas para el movimiento de las alas, definir en forma interactiva distintas geometrías para el insecto, predecir el campo de movimiento del fluido alrededor de la estructura del cuerpo y de las alas batientes, estimar la distribución espacio-temporal de la vorticidad adherida al cuerpo/alas del insecto, estimar la distribución de vorticidad y forma de las estelas emitidas desde los bordes filosos de las alas, predecir las cargas aerodinámicas actuantes sobre éstas, y tener en cuenta todas las posibles interferencias aerodinámicas.

Palabras clave – Aerodinámica no-lineal e inestacionaria, alas batientes, micro-vehículos aéreos.

1. INTRODUCCIÓN

A través de millones de años de evolución la naturaleza ha logrado optimizar sus recursos con el fin de maximizar el desempeño de las estructuras biológicas existentes sobre nuestro planeta [1]. Este hecho motivó, desde tiempos inmemoriales, la búsqueda de conceptos de diseño basados en las criaturas vivientes; por ejemplo, Leonardo da Vinci diseñó una máquina voladora a partir de numerosos estudios realizados sobre la anatomía de aves. En los últimos años se han producido grandes avances en diferentes áreas de la ciencia relacionadas con el diseño de dispositivos artificiales a partir del estudio y observación de organismos, sistemas y procesos existentes en la naturaleza.

En muchos casos se ha tratado de realizar una imitación biológica completa de un insecto, ave, o pez, obteniéndose resultados poco alentadores. Es crucial hacer una distinción entre lo que se entiende por imitación biológica (biomimética) e inspiración en la biología. La biomimética o copia de un organismo



Fig. 1. Aplicaciones posibles de MAVs; (a) Inspección de ambientes peligrosos para la salud humana; (b) Inspección de edificios colapsados; (c) Exploración de atmósferas no terráneas.

vivo es muy difícil de lograr con la tecnología que existe actualmente, por otro lado, la inspiración en la biología, es un buen punto de partida para dar un primer paso hacia el diseño y posterior construcción de robots que tengan un desempeño igual o superior a las entidades biológicas existentes en la naturaleza [2].

Actualmente, la comunidad científica se ha concentrado específicamente en el desarrollo de microvehículos aéreos (MAVs) inspirándose para ello en el vuelo de insectos, tales como moscas, libélulas y abejas, y también en pequeñas aves que muestran una increíble habilidad para ejecutar maniobras extremadamente complejas como el colibrí. El renovado interés por esta clase especial de vehículos está impulsado por las potenciales aplicaciones que podrían abordarse, tales como: intervención en misiones de rescate y vigilancia [3], y exploración de ambientes hostiles (incluyendo en el futuro atmósferas no terráneas e inspección de edificios colapsados), entre otras (ver Fig. 1).

1.1. Progresos en el diseño de MAVs en la última década

En la Fig. 2 se pueden observar los prototipos de MAVs más importantes construidos desde el año 2000 hasta la fecha. El *Microbat* (Fig. 2a) fue diseñado en forma conjunta por Aerovironment y Caltech siendo el primer MAV construido con fondos destinados a impulsar el desarrollo de esta nueva tecnología (<http://www.reallycooltoys.com/news/news2.html>).

En el año 2002 en la Universidad de Toronto se construyó el *Mentor* (Fig. 2b), primer MAV equipado con un sistema de radio control y capaz de realizar ‘hover’ (vuelo suspendido), a partir de ese momento la capacidad de ejecutar maniobras de este tipo fue incluido como un parámetro de diseño fundamental en el desarrollo de las nuevas generaciones de MAVs (<http://www.ornithopter.org/history.mav.shtml>).

En el año 2005, dos universidades holandesas, la Universidad Técnica de Delft en conjunto con la Universidad de Wageningen, construyeron un MAV con la capacidad de cambiar entre dos configuraciones de vuelo distintas, ‘forward flight’ (vuelo hacia adelante) y ‘hover’. Este vehículo que fue bautizado con el nombre de *Delfly I* (Fig. 2c) está equipado con una cámara de video que permite obtener, en combinación con una baja velocidad de vuelo, una visión general de su entorno (<http://www.delfly.nl>).

El *Delfly II*, (Fig. 2d) evolución del *Delfly I*, tiene un peso de sólo 16 gramos y una envergadura de 28 cm, es casi un 50% mas pequeño que el *Delfly I*. Las principales características que lo destacan respecto a su antecesor son: *i*) mayor autonomía lograda utilizando una nueva batería de litio (8 minutos en hover o 15 minutos en vuelo convencional); y *ii*) capacidad de utilizar la cámara de video como un lazo de control permitiendo que dicho vehículo pueda ser piloteado exitosamente por un aficionado (<http://www.delfly.nl>).

En el año 2007, Petter Muren construyó un pequeño MAV (Fig. 2e) con una Envergadura de 10 cm, un peso de 1.1 gr. (http://www.proxdynamics.com/r_d/micro_helicopters_and_ornithopters) y una capacidad de vuelo menor a un minuto. Durante el 3rd US-European Competition and Workshop on Micro Air Vehicles MAV07 llevada a cabo en Toulouse, Francia, Muren ganó un premio especial por construir el microvehículo aéreo a radio control mas pequeño del mundo.

Por último, la nueva generación del *Delfly*, el *Delfly micro* (Fig. 2f), tiene una envergadura de 10 cm, un peso de 3 gramos y una autonomía cercana a los 3 minutos. Hasta la fecha el *Delfly micro* es el vehículo volador equipado con una cámara de video más pequeño construido en el mundo (<http://www.delfly.nl>).

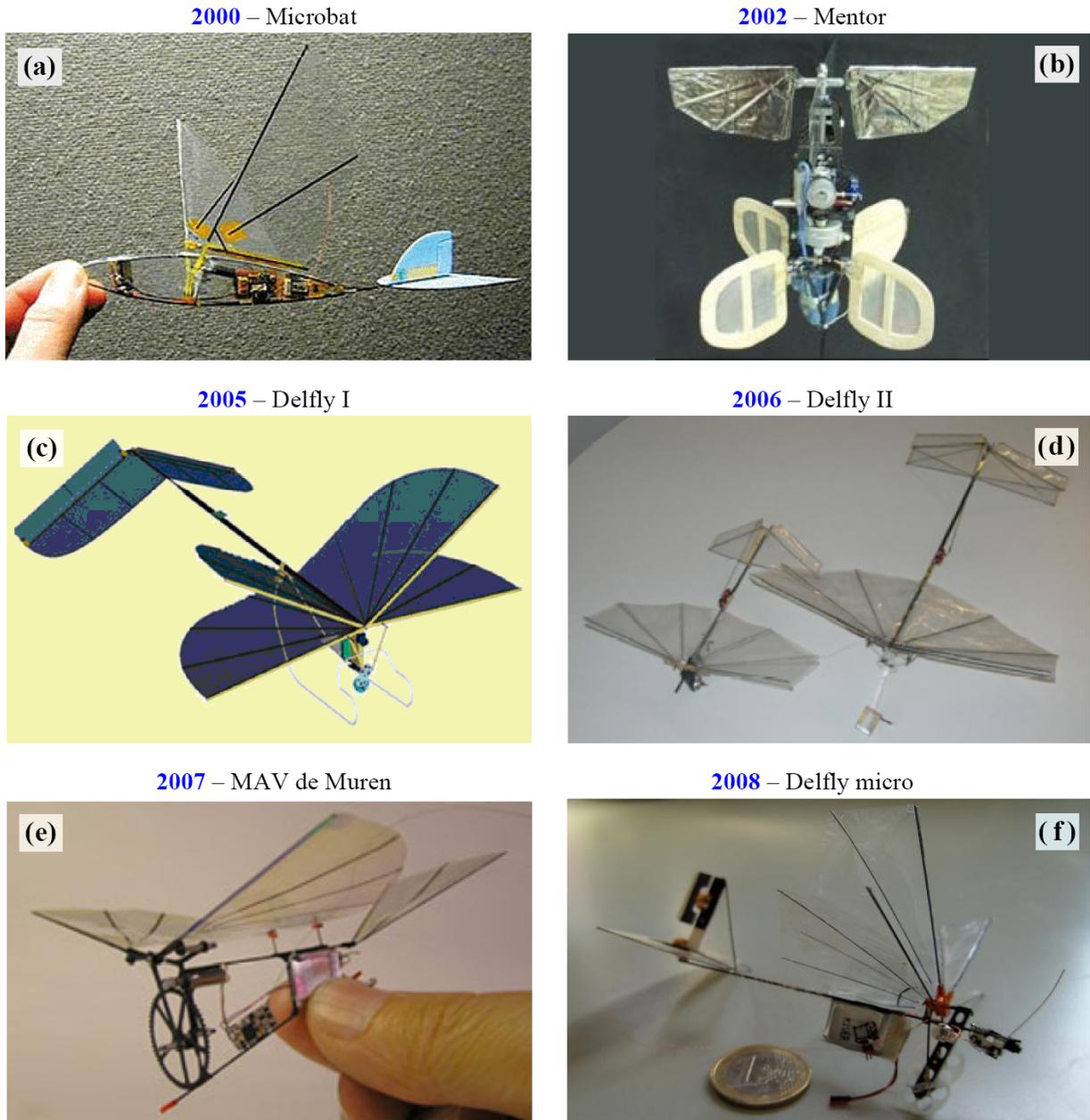


Fig. 2. Historia del progreso en el diseño de MAVs en la última década.

A pesar de los grandes logros obtenidos en la última década respecto al diseño de MAVs, los entes biológicos concebidos por la naturaleza aventajan a sus análogos mecánicos en muchos aspectos, algunos fueron puestos en evidencia en esta sección introductoria, tales como el problema del tamaño y de la autonomía del vehículo. Estas son variables interrelacionadas y por lo tanto es extremadamente complejo, sino casi imposible, maximizar o minimizar dichas cantidades en forma independiente, al menos con la tecnología que existe actualmente [4].

1.2. Estudios recientes sobre el vuelo con alas batientes

Un aspecto importante en la carrera por diseñar y construir un MAV funcional es entender definitivamente cómo los insectos y aves pequeñas baten sus alas para obtener la fuerza de sustentación suficiente para mantenerse en vuelo y el empuje necesario para desplazarse a través del aire.

Existen numerosos trabajos experimentales sobre el estudio de la aerodinámica de insectos, los cuales proveen una buena descripción cualitativa de los mecanismos aerodinámicos no-convencionales utilizados por estas criaturas para mantenerse en vuelo. Por el contrario, una descripción cuantitativa precisa de tales fenómenos es difícil de lograr debido a los errores inherentes a las técnicas usadas para realizar las mediciones de las magnitudes de interés.

Ellington [5] estudió los mecanismos de sustentación presentes en el vuelo de insectos para una configuración de vuelo suspendida (hover). Para ello combinó resultados experimentales con la teoría de perfiles delgados concluyendo que el desprendimiento de vorticidad desde el borde de ataque es una característica fundamental en el vuelo de insectos y aves pequeñas. Posteriormente, Van den Berg y Ellington estudiaron específicamente el desprendimiento de vorticidad desde el borde de ataque de una polilla, *Manduca sexta*, utilizando un insecto robot a escala (*the flapper*) [6]. El experimento confirmó la presencia de un pequeño vórtice desprendiéndose desde el borde de ataque (VBA). Además, determinaron que el mecanismo inestacionario responsable de la producción de este fenómeno es el retraso de la pérdida dinámica (delayed stall) que se ilustra más adelante en la Fig. 3a.

Ellington [7] y Usherwood *et al.* [8] estudiaron en detalle el vuelo con alas batientes con el fin de explorar el diseño de micro vehículos aéreos que muestren un comportamiento aerodinámico similar a las criaturas vivientes analizadas. Paralelamente, Dickinson [9] utilizó un robot mecánico a escala para investigar los efectos de la rotación del ala sobre el desempeño aerodinámico de pequeños insectos, y cinco años más tarde publicó un trabajo en el cual analizó varios aspectos de la cinemática del ala concluyendo que los grandes niveles de sustentación logrados por los insectos durante un ciclo de batimiento se deben a la acción conjunta de tres mecanismos aerodinámicos inestacionarios: *i*) el retraso de la pérdida dinámica (*delayed stall*); *ii*) la sustentación rotacional (*rotational lift*); y *iii*) la captura de la estela (*wake capture*) [10] (estos mecanismos se describen en la sección 1.3.). Lehmann y Pick [11] investigaron la producción de fuerzas de sustentación debidas a un cuarto mecanismo denominado aplauso y separación (*clap and fling*) conocido también con el nombre de mecanismo de Weis Fogh [12]. Los cuatro mecanismos aerodinámicos no-convencionales introducidos anteriormente en conjunto con el fenómeno de desprendimiento de vorticidad desde el borde de ataque son los principales responsables del vuelo a pequeñas escalas [13-14].

Desde el punto de vista numérico, Vest y Katz [15] utilizaron el método de los paneles para estudiar la aerodinámica no-estacionaria de un modelo de alas batientes. Ramamurti y Sandberg [16] emplearon las ecuaciones de Euler para computar numéricamente el flujo tridimensional alrededor del ala de una mosca. Ramamurti comparó, específicamente, los valores de las fuerzas de empuje y de arrastre obtenidas mediante simulaciones numéricas con mediciones experimentales llevadas a cabo por Dickinson *et al.* obteniendo una buena correlación entre ellas Ansari *et al.* [17] implementó numéricamente un modelo aerodinámico basado en la teoría de elementos de palas (*blade-element theory*) ampliamente usado en el estudio de alas con altas relaciones de aspecto (*aspect-ratio*) tales como los rotores de helicópteros. Ansari comparó sus resultados con el trabajo de Dickinson [10].

Sin duda, el mejor camino para entender en forma definitiva el vuelo de estas criaturas es resolver la versión completa de las ecuaciones de Navier-Stokes para un flujo tridimensional alrededor del cuerpo y de las alas de un insecto o pájaro. Sin embargo, debido a la característica inestacionaria del fluido moviéndose alrededor de una geometría que cambia en forma permanente a lo largo de un ciclo de batimiento esta solución no es viable, al menos, actualmente.

En este trabajo se presenta la implementación numérica de un modelo aerodinámico basado en el método de red de vórtices no-estacionario y no-lineal (UVLM). El modelo fue modificado con el objeto de incluir el cuerpo del insecto (cabeza, tórax y abdomen) y aceptar diferentes patrones que describen el movimiento del ala durante un ciclo completo de batimiento. En este esfuerzo se utilizó la cinemática desarrollada por Dickinson para mover un robot a escala de una mosca doméstica (Robofly) [18].

Si bien el número de Reynolds que caracteriza el flujo real en los insectos es relativamente bajo, puede considerarse que tiene un valor lo suficientemente alto como para asumir que los efectos viscosos están confinados únicamente a las capas límites que envuelven al sólido inmerso en el fluido y a las estelas que se desprenden desde los bordes filosos de las alas. Este hecho permite utilizar un modelo basado en el método de red de vórtices inestacionario y no-lineal.

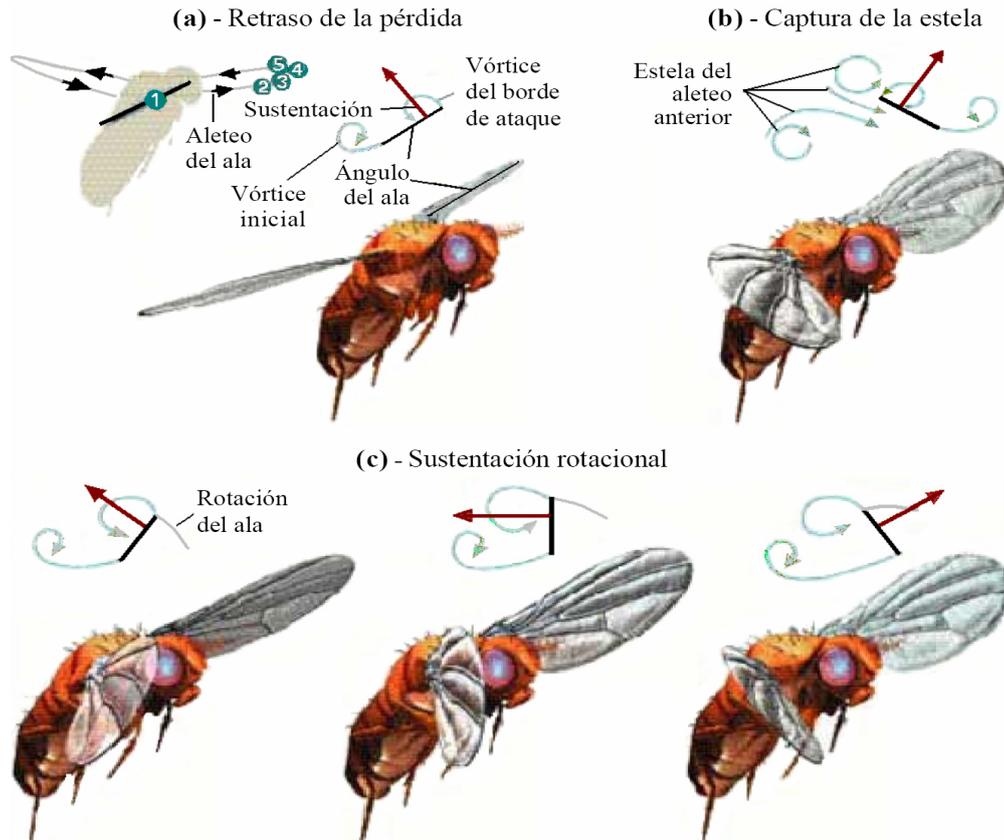


Fig. 3. Mecanismos aerodinámicos no convencionales: (a) Retraso de la pérdida dinámica; (b) Captura de la estela; (c) Sustentación rotacional [21].

1.3. Mecanismos de vuelo con alas batientes

Los vehículos voladores convencionales utilizan sistemas de propulsión basados en hélices o turbinas para lograr empuje, y alas fijas o rotores para generar sustentación. Sin embargo, la fisiología de los sistemas de propulsión y sustentación del vuelo animal es dominada por movimientos complejos de las alas, relativos a sus trayectorias de vuelo, involucrando simultáneamente: rotaciones, oscilaciones y cambios significativos en el ángulo de ataque [19]. La compleja topología de las trayectorias de puntos materiales contenidos en el ala, producto del aleteo de estas criaturas, producen mecanismos aerodinámicos altamente no-lineales e inestacionarios que son eficaces cuando los números de Reynolds son moderados y bajos, tales como:

- El *retraso de la pérdida dinámica* aparece cuando el ala comienza a moverse; en ese instante se genera un vórtice detrás del borde de fuga y otro asimétrico cerca de la posición original del ala. Dichos vórtices producen una fuerza aerodinámica neta perpendicular a la superficie del ala, lo cual implica un incremento importante en la sustentación (ver Fig. 3a).
- La *captura de la estela* ocurre durante un pequeño intervalo de tiempo al final de cada fase de traslación del ala, donde la misma se ve beneficiada por el vórtice emitido en el ciclo previo. Con el ala convenientemente orientada, el aire en movimiento, producto de la vorticidad presente en la estela, contribuye efectivamente a la sustentación (ver Fig. 3b).
- La *sustentación rotacional* está relacionada con el aumento de la sustentación total debido al incremento de circulación producido por la rotación del ala alrededor de su eje longitudinal. Los investigadores notaron que durante la fase descendente (*downstroke*) el ala gira alrededor

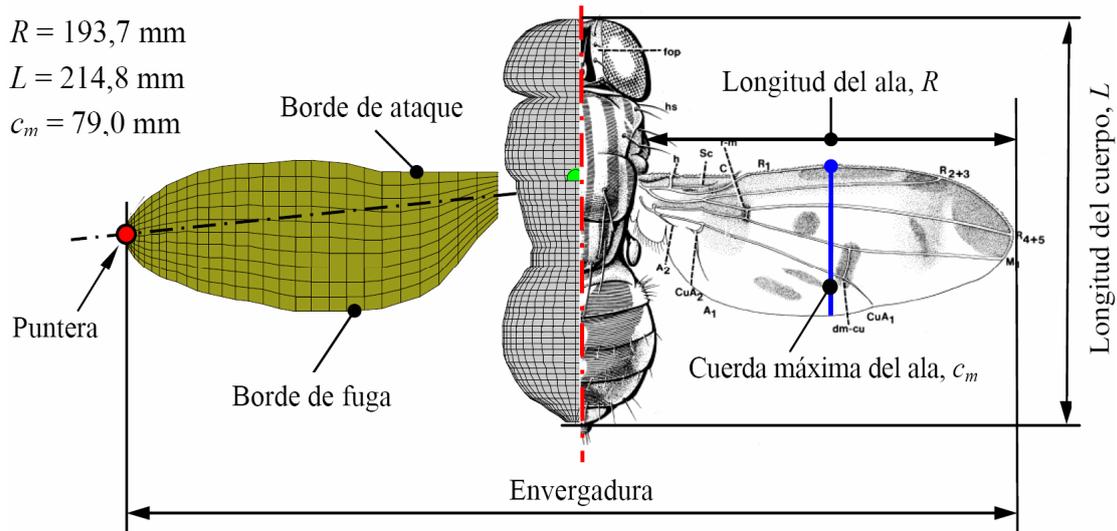


Fig. 4. Definición de los parámetros morfológicos [22].

respecto de su eje longitudinal de manera que su borde de ataque se mueve efectivamente hacia abajo (*pronation*); y que durante la fase ascendente (*upstroke*) gira en el sentido contrario (*supination*) [20]. La circulación rotacional puede calcularse mediante la teoría de perfiles delgados, estos resultados han sido confirmados por numerosos experimentos [10,18] (ver Fig. 3c).

2. GEOMETRÍA DEL MODELO

Para estudiar la aerodinámica de alas batientes, en este trabajo, se adoptó la geometría correspondiente a una mosca de la fruta (*fruit fly*) similar a la empleada por Markow [22]. Los principales parámetros morfológicos de la criatura que han sido preservados en este estudio son: la longitud del ala, R , la longitud del cuerpo, L , la cuerda máxima del ala, c_m , y la forma del ala (ver Fig. 4).

En este trabajo el tamaño del insecto corresponde al tamaño real del robotfly. Los valores de las medidas principales (R , L y c_m) obtenidas después del escalado del insecto se presentan en la Fig. 4.

Cada una de las partes del cuerpo del insecto (tórax, abdomen y cabeza) fue modelada, por simplicidad, mediante superficies de revolución. El modelo completo del insecto, incluyendo las alas, fue realizado íntegramente en MATLAB, y se utilizó una técnica de parametrización con el fin de construir modelos de diferentes tamaños conservando las proporciones de la criatura (ver Fig. 5). Para discretizar las superficies de revolución que componen el cuerpo del insecto como así también las superficies planas que modelan sus alas se utilizaron elementos cuadriláteros de cuatro nodos.

3. EL MODELO AERODINÁMICO

El modelo aerodinámico implementado en este trabajo es una versión ampliada y modificada del método general de red de vórtices no-lineal e inestacionario (*unsteady vortex lattice method* o UVLM), comúnmente utilizado en la dinámica de fluidos. Este modelo permite tener en cuenta no-linealidades aerodinámicas asociadas con grandes ángulos de ataque, deformaciones estáticas y flujos dominados por vorticidad en los que el fenómeno conocido como *vortex bursting* no ocurre. Además permite incluir naturalmente: *i*) todas las posibles interferencias aerodinámicas; *ii*) estimar, en el dominio del tiempo, la distribución de vorticidad asociada a la sábana vorticiosa adherida a los sólidos; y *iii*) la distribución de vorticidad y la forma de las estelas emitidas desde los bordes filosos del cuerpo inmerso en el fluido.

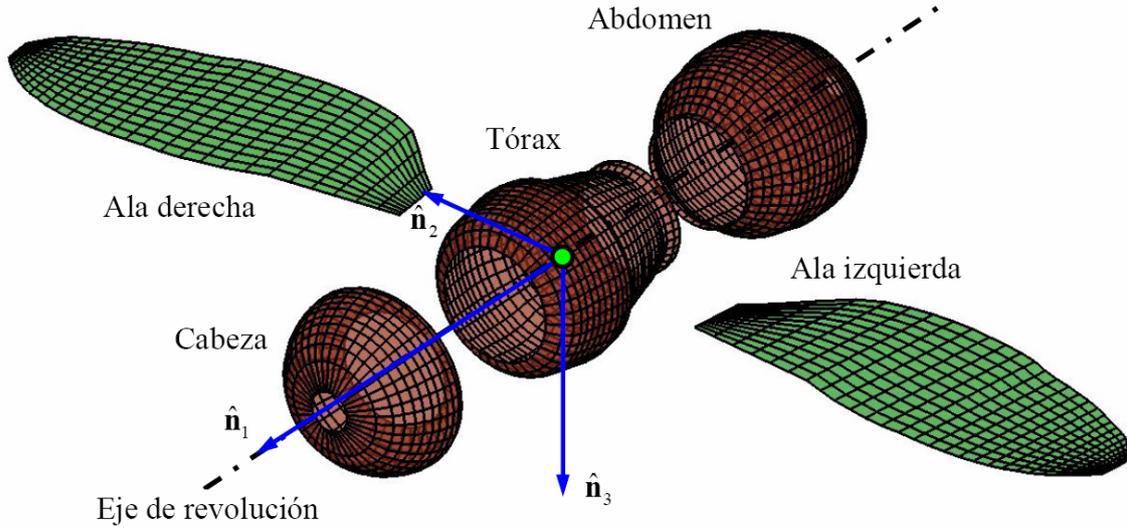


Fig. 5. Vista 3D del mallado de un insecto.

En este modelo se restringe toda la vorticidad del flujo a una delgada región alrededor del ala y a sus estelas, además, el flujo se considera irrotacional fuera de estas regiones. Las estelas se representan mediante sábanas vorticosas libres. Sus posiciones no son especificadas ya que pueden deformarse libremente hasta adoptar configuraciones libres de fuerzas de modo que no se produce a través de éstas ningún salto de presiones. Los dos tipos de sábanas vorticosas (libres y adheridas) están unidas en los bordes filosos donde se separan, y donde es impuesta la condición de Kutta para flujo inestacionario. A medida que el ala se mueve durante un ciclo de batimiento el ángulo de ataque efectivo puede alcanzar valores altos que producen una separación adicional del flujo desde el borde de ataque. Este fenómeno no está incorporado en el modelo.

En las secciones siguientes se presentan algunos aspectos importantes de la formulación matemática y de la implementación computacional del modelo desarrollado en este trabajo. Para más detalles acerca del UVLM pueden consultarse los trabajos de Konstadinopoulos [23] y Preidikman [24].

3.1. Formulación matemática del UVLM

Se denota mediante $\mathbf{V}(\mathbf{R}, t)$ a la velocidad absoluta de una partícula de fluido que ocupa en el tiempo t la posición \mathbf{R} en el dominio fluido, $p(\mathbf{R}, t)$ a la presión del fluido en esa posición, y ρ a la densidad del fluido, considerada constante. Si el número de Reynolds es lo suficientemente alto y la densidad es constante las ecuaciones de Navier-Stokes se reducen a las ecuaciones de Euler,

$$\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + (\mathbf{V} \cdot \nabla) \mathbf{V} = -\frac{1}{\rho} \nabla p \quad \text{donde } \nabla = \left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z} \right) \quad (1)$$

Esta ecuación es complementada con la ecuación de continuidad para flujos incompresibles,

$$\nabla \cdot \mathbf{V}(\mathbf{R}, t) = 0 \quad (2)$$

El campo de velocidades, $\mathbf{V}(\mathbf{R}, t)$, está relacionado cinemáticamente con el campo de vorticidad, $\boldsymbol{\omega}(\mathbf{R}, t)$, a través de la siguiente expresión,

$$\boldsymbol{\omega}(\mathbf{R}, t) = \nabla \times \mathbf{V}(\mathbf{R}, t) \quad (3)$$

Las ecuaciones (2) y (3) representan un sistema de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales que pueden ser ‘invertidas’ a los efectos de expresar el campo de velocidades en términos del campo de vorticidad [25],

$$\mathbf{V}(\mathbf{R}, t) = \frac{1}{4\pi} \iiint_{\Omega(\mathbf{R}_0, t)} \frac{\boldsymbol{\omega}(\mathbf{R}_0, t) \times (\mathbf{R} - \mathbf{R}_0)}{|\mathbf{R} - \mathbf{R}_0|^2} d\Omega(\mathbf{R}_0, t) \quad (4)$$

donde $\Omega(\mathbf{R}_0, t)$ es una región del dominio fluido, \mathbf{R}_0 es el vector posición que define esa región, y $\boldsymbol{\omega}(\mathbf{R}_0, t)$ es el vector vorticidad en la posición \mathbf{R}_0 . El integrando en (4) es cero cuando $\boldsymbol{\omega}(\mathbf{R}_0, t)$ es nulo, por lo tanto la región donde el flujo es irrotacional no contribuye al campo de velocidades $\mathbf{V}(\mathbf{R}, t)$. Esto permite determinar dicho campo tanto en la región viscosa como en la no viscosa considerando únicamente la distribución de vorticidad en la región viscosa. La ecuación que gobierna la evolución de las sábanas vorticosas esta mal condicionada y sufre de una inestabilidad del tipo de Kelvin–Helmholtz [26].

Estudios preliminares ([27] y [28]) han concluido que: *i*) la solución de esta ecuación puede contener singularidades para ciertos instantes de tiempo; aun en el caso en que las condiciones iniciales sean suaves, y *ii*) el intento de computar numéricamente esta solución mediante el uso de una aproximación basada en segmentos vorticosos amplifica los errores de discretización de forma tal que eventualmente la hacen “explotar”. La velocidad de un punto material P que ocupa una posición espacial \mathbf{R} asociada a un segmento vorticoso rectilíneo, de longitud finita, y con circulación espacial constante $\Gamma(t)$ esta dada por la ley de Biot-Savart, esto es,

$$\mathbf{V}(\mathbf{R}, t) = \frac{\Gamma(t)}{4\pi} \frac{\boldsymbol{\omega}(\mathbf{R}, t) \times \mathbf{r}_1}{|\boldsymbol{\omega}(\mathbf{R}, t) \times \mathbf{r}_1|^2} [\boldsymbol{\omega}(\mathbf{R}, t) \cdot (\hat{\mathbf{e}}_1 - \hat{\mathbf{e}}_2)] \quad (5)$$

donde \mathbf{r}_1 y \mathbf{r}_2 son, respectivamente, las distancias desde el extremo inicial y final del elemento vorticoso hasta la posición espacial \mathbf{R} donde se computa la velocidad; $\hat{\mathbf{e}}_1$ y $\hat{\mathbf{e}}_2$ son vectores unitarios asociados a los vectores \mathbf{r}_1 y \mathbf{r}_2 , respectivamente.

Cuando el punto material P pertenece al segmento vorticoso la ecuación (5) presenta una singularidad. Esta característica es indeseable desde el punto de vista numérico. El modo más común de sortear este problema consiste en reemplazar el núcleo singular de Cauchy $\mathbf{K}(\mathbf{R} - \mathbf{R}_0)$ de la ecuación (4), por un núcleo “suavizado”. Alternativas para suavizar el núcleo de Cauchy incluyen: *vortex-blob regularization*, *vortex-patch regularization*, *viscous regularization*, entre otras [26]. En este trabajo se sigue una técnica de regularización ad hoc de la integral de Biot–Savart originalmente introducida por Chorin. En esta técnica, el núcleo singular $\mathbf{K}(\mathbf{R} - \mathbf{R}_0)$ es reemplazado por un núcleo suavizado $\mathbf{K}_\delta(\mathbf{R} - \mathbf{R}_0; \delta)$ de manera que cuando el parámetro δ (comúnmente conocido como radio de *cut-off*) tiende a cero se recupera la solución correspondiente a un flujo no viscoso gobernado por las ecuaciones de Euler. Con esta regularización, la expresión para el campo de velocidades asociado a un segmento vorticoso rectilíneo de la ecuación (5) toma la siguiente forma:

$$\mathbf{V}(\mathbf{R}, t) = \frac{\Gamma(t)}{4\pi} \frac{\boldsymbol{\omega}(\mathbf{R}, t) \times \mathbf{r}_1}{|\boldsymbol{\omega}(\mathbf{R}, t) \times \mathbf{r}_1|^2 + (\delta |\boldsymbol{\omega}(\mathbf{R}, t)|)^2} [\boldsymbol{\omega}(\mathbf{R}, t) \cdot (\hat{\mathbf{e}}_1 - \hat{\mathbf{e}}_2)] \quad (6)$$

3.2. Cinemática

Para describir la cinemática se emplean cinco sistemas de referencias: *i*) un sistema de referencia inercial o Newtoniano $\mathbf{N} = \{\hat{\mathbf{n}}_1, \hat{\mathbf{n}}_2, \hat{\mathbf{n}}_3\}$; *ii*) un sistema fijo al cuerpo del insecto, $\mathbf{T} = \{\hat{\mathbf{t}}_1, \hat{\mathbf{t}}_2, \hat{\mathbf{t}}_3\}$, ubicado en el centro de masa del tórax (\mathbf{cm}_T); *iii*) un sistema fijo al plano de aleteo, $\mathbf{Z} = \{\hat{\mathbf{z}}_1, \hat{\mathbf{z}}_2, \hat{\mathbf{z}}_3\}$; *iv*) un sistema fijo al ala derecha, $\mathbf{A} = \{\hat{\mathbf{a}}_1, \hat{\mathbf{a}}_2, \hat{\mathbf{a}}_3\}$; y *v*) un sistema fijo al ala izquierda, $\mathbf{B} = \{\hat{\mathbf{b}}_1, \hat{\mathbf{b}}_2, \hat{\mathbf{b}}_3\}$. El uso de los sistemas de referencia \mathbf{A} y \mathbf{B} facilitan la discretización espacial de cada una de las alas (ver Fig. 6a).

Para describir la trayectoria de un punto material arbitrario contenido en un ala del insecto se realizan los siguientes pasos en secuencia:

- Se orienta el insecto en el espacio mediante el *body angle*, χ .
- Se orienta el plano de aleteo respecto de un eje perpendicular al eje longitudinal del insecto utilizando el ángulo β .

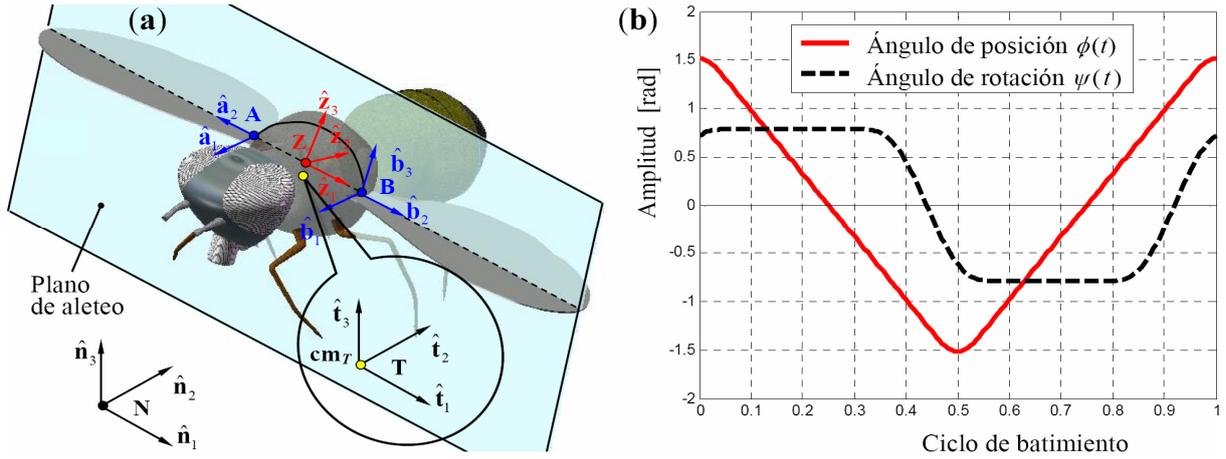


Fig. 6. (a) Definición de los cinco sistemas de referencias; (b) Evolución temporal de los ángulos $\phi(t)$ y $\psi(t)$ durante un ciclo de batimiento.

- Se orienta el ala respecto del marco de referencia \mathbf{Z} fijo al plano de aleteo utilizando una secuencia de ángulos de Euler (1–3–2) mediante el ángulo de posición dentro del plano de aleteo (*stroke position angle*), $\phi(t)$, el ángulo de desviación respecto del plano de aleteo (*stroke deviation angle*), $\theta(t)$, y el ángulo de rotación (*rotation angle*), $\psi(t)$.

Más detalles sobre el modelado cinemático y las expresiones finales para los vectores posición y velocidad de un punto material genérico del ala se pueden consultar en [19].

La Fig. 6b muestra la evolución temporal de los ángulos ϕ y ψ correspondiente a la cinemática utilizada por Dickinson [18]. Adicionalmente, con el objeto de simplificar el análisis, el ángulo θ se asume idénticamente igual a cero durante todo el ciclo de batimiento.

3.3. Condiciones de frontera

Las condiciones de frontera que se imponen en este problema son dos: *i*) la condición en el infinito, y *ii*) la condición de no penetración.

La condición en el infinito fuerza a que las perturbaciones debidas al cuerpo moviéndose a través del fluido, que estaba inicialmente en reposo, se anulen suficientemente lejos del cuerpo inmerso en el seno del fluido. Esto es equivalente a decir que las velocidades asociadas a la vorticalidad de las sábanas libres y adheridas tienden a cero lejos del insecto, es decir,

$$\lim_{|\mathbf{R}| \rightarrow \infty} |\mathbf{V}_B(\mathbf{R}, t) + \mathbf{V}_W(\mathbf{R}, t)| = 0 \quad (7)$$

donde $\mathbf{V}_B(\mathbf{R}, t)$ es la velocidad asociada a la sábana vortical adherida al sólido deformable inmerso en el seno del fluido y $\mathbf{V}_W(\mathbf{R}, t)$ es la velocidad asociada a las sábanas vorticalas libres (estelas).

La condición de no penetración es aplicada sobre toda la frontera del sólido, esto es: sobre la superficie de las alas y del cuerpo del insecto, cuya posición, velocidad, y aceleración son conocidas en todo instante. Esta condición de borde, también llamada de impermeabilidad, requiere que la componente normal de la velocidad relativa a la superficie del cuerpo de todas las partículas del fluido adyacentes a la superficie del sólido sea igual cero,

$$(\mathbf{V}_\infty + \mathbf{V}_B + \mathbf{V}_W - \mathbf{V}_p) \cdot \hat{\mathbf{n}} = 0 \quad (8)$$

donde \mathbf{V}_∞ es la velocidad de la corriente libre, \mathbf{V}_p es la velocidad del sólido deformable (alas y cuerpo del insecto) y $\hat{\mathbf{n}}$ es un vector unitario normal a la superficie de las alas y cuerpo de la criatura.

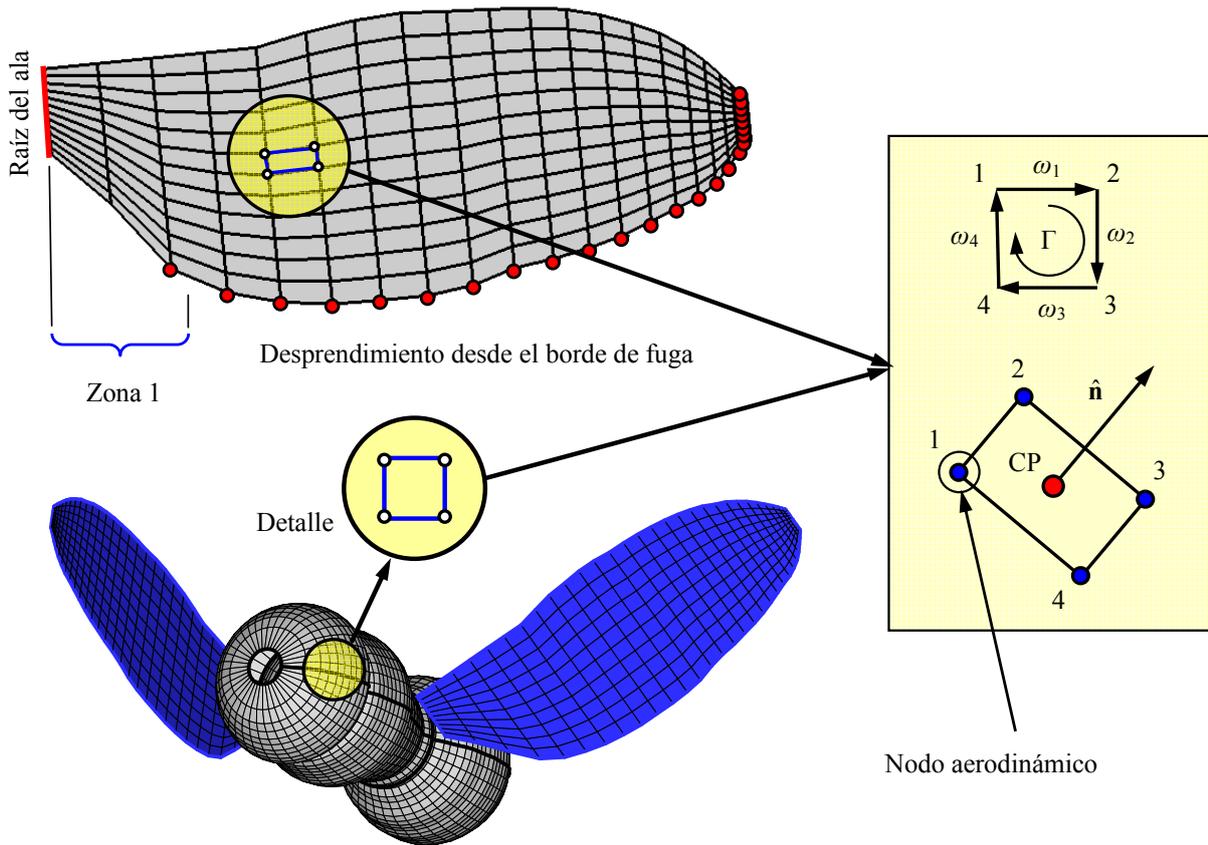


Fig. 7. Discretización de la sábana vorticiosa adherida al ala y al cuerpo del insecto.

3.4. Discretización de las sábanas vorticiosas

En el método de red de vórtices inestacionario se reemplazan las sábanas vorticiosas continuas adheridas a las superficies del sólido inmerso en el fluido por una red formada por segmentos vorticiosos rectilíneos, ω_i , conectados entre sí en los llamados *nodos aerodinámicos* (Fig. 7). El modelo se completa mediante una discretización similar de las estelas. En esa figura se indican en color rojo los nodos aerodinámicos que se desprenden desde el borde de fuga transportando vorticidad hacia el seno del fluido para, así, formar las estelas. No todos los nodos aerodinámicos ubicados en el borde de fuga son desprendidos; esto es: existe una zona cercana a la raíz del ala (Zona 1 sobre el borde de fuga) en la cual no se produce desprendimiento. Este ajuste mejora notablemente la forma de la estela que se obtiene en las proximidades de la raíz del ala.

Debido a que las sábanas vorticiosas continuas son reemplazadas por un conjunto discreto de vórtices, la condición de no penetración dada por (8) puede ser satisfecha solo en un número finito de puntos. Estos son llamados puntos de control (CP) de la malla adherida y están ubicados en el centroide del área de cada paralelogramo formado por cuatro segmentos vorticiosos consecutivos (Fig. 7).

3.5. Cálculo de las cargas aerodinámicas

Para determinar las cargas aerodinámicas sobre las superficies sustentadoras, primero se debe hallar el salto de presión en el CP de cada elemento (elemento = paralelogramo formado por cuatro segmentos vorticiosos) de la red, luego multiplicarlo por el área del mismo y proyectarlo en la dirección del vector normal a dicho elemento. Para calcular la distribución de la presión sobre la superficie de las alas se utili-

za la versión inestacionaria de la ecuación de Bernoulli. Finalmente, se suman las fuerzas actuantes en todos los elementos.

Para flujos inestacionarios, la ecuación de Bernoulli toma la siguiente forma,

$$H(t) = \frac{\partial}{\partial t} \Phi(\mathbf{R}, t) + \frac{1}{2} \nabla_{\mathbf{R}} \Phi(\mathbf{R}, t) \cdot \nabla_{\mathbf{R}} \Phi(\mathbf{R}, t) + \frac{p(\mathbf{R}, t)}{\rho} \quad (9)$$

donde $\Phi(\mathbf{R}, t)$ es la función potencial de velocidad, $\mathbf{V}(\mathbf{R}, t) = \nabla_{\mathbf{R}} \Phi(\mathbf{R}, t)$, y $H(t)$ la energía total.

Para llevar a cabo las simulaciones numéricas, se introducen las siguientes cantidades adimensionales,

$$L_c = \sqrt{\frac{A}{NE}}, \quad T_c = \frac{1}{n_f} \frac{1}{N_{st}}, \quad V_c = \frac{L_c}{T_c}, \quad \rho_c = \rho_{aceite} \quad (10)$$

donde A es la suma de las áreas de todos los paneles que conforman la sábana adherida al sólido inmerso en el fluido (cuerpo/alas), NE es el número de paneles, n_f es la frecuencia de batimiento, N_{st} es el número de pasos de tiempo, ρ_{aceite} es la densidad del aceite mineral utilizado en el experimento de Dickinson, y L_c , V_c , ρ_c , y T_c , son la longitud característica, la velocidad característica, la densidad característica y el tiempo característico, respectivamente. En este trabajo, para la frecuencia de batimiento, se adoptó el mismo valor que utilizó Dickinson para efectuar sus experimentos con el *robobfly*, esto es, $n_f = 0,168$ Hz.

Utilizando las magnitudes definidas en (10) es posible adimensionalizar (9) y determinar el salto de presión, Δp , a través de cada uno de los elementos que conforman la red de vórtices,

$$\Delta p = \mathbf{V}_U^2 - \mathbf{V}_L^2 + 2 \left(\left. \frac{\partial \Phi}{\partial t} \right|_{\mathbf{R}_U} - \left. \frac{\partial \Phi}{\partial t} \right|_{\mathbf{R}_L} \right) \quad (11)$$

donde \mathbf{V}_U y \mathbf{V}_L son, respectivamente, las velocidades de las partículas de fluido ubicadas inmediatamente por encima y por debajo del punto de control del elemento considerado.

El último término de la expresión (11) puede reescribirse como:

$$\left(\left. \frac{\partial \Phi}{\partial t} \right|_{\mathbf{R}_U} - \left. \frac{\partial \Phi}{\partial t} \right|_{\mathbf{R}_L} \right) = \frac{\mathcal{D}}{\mathcal{D}t} G(t) - \Delta \mathbf{V} \cdot (\mathbf{V}_P) \quad (12)$$

donde $G(t)$ es la circulación alrededor del elemento considerado, y $\mathcal{D}/\mathcal{D}t$ es una ‘especie’ de derivada sustancial, ya que no sigue una partícula de fluido sino un punto material del ala, en este caso un punto de control, $\Delta \mathbf{V}$ es la diferencia de velocidad entre un punto ubicado en la parte superior e inferior de la superficie sustentadora en el elemento considerado, y \mathbf{V}_P es la velocidad del sólido deformable [24].

En este trabajo, la derivada sustancial, $\mathcal{D}/\mathcal{D}t$, se calcula utilizando una aproximación por diferencias finitas hacia atrás de primer orden,

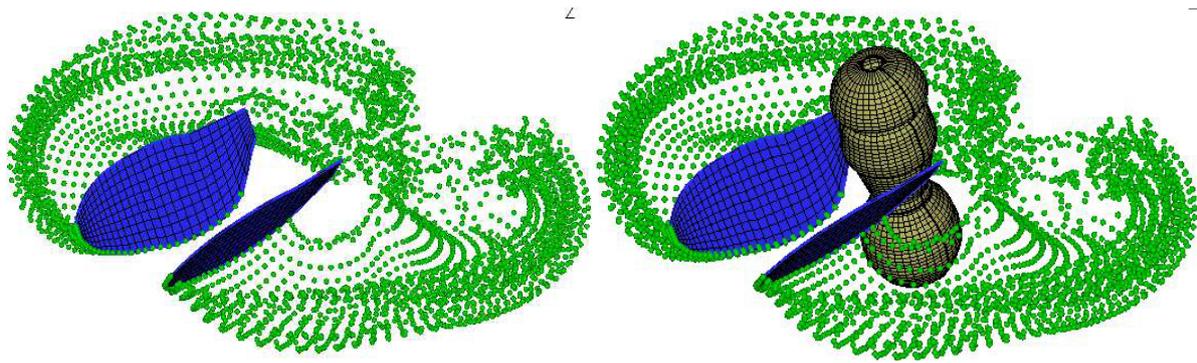
$$\frac{\mathcal{D}}{\mathcal{D}t} G(t) \cong \frac{G(t) - G(t - \Delta t)}{\Delta t} \quad (13)$$

Por lo tanto, el término inestacionario se determina utilizando la información de la circulación en el paso anterior y la correspondiente al instante de tiempo actual.

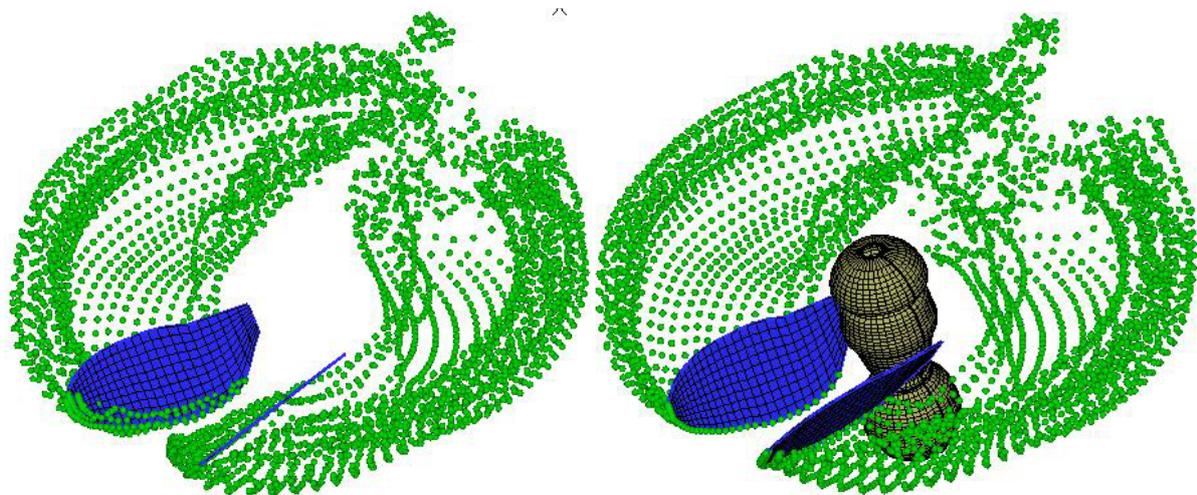
4. SIMULACIONES NUMÉRICAS

En este trabajo se analiza en que medida la presencia del cuerpo del insecto modifica la generación de sustentación. Para ello se computa la fuerza de sustentación de dos maneras, considerando y no considerando el cuerpo del insecto.

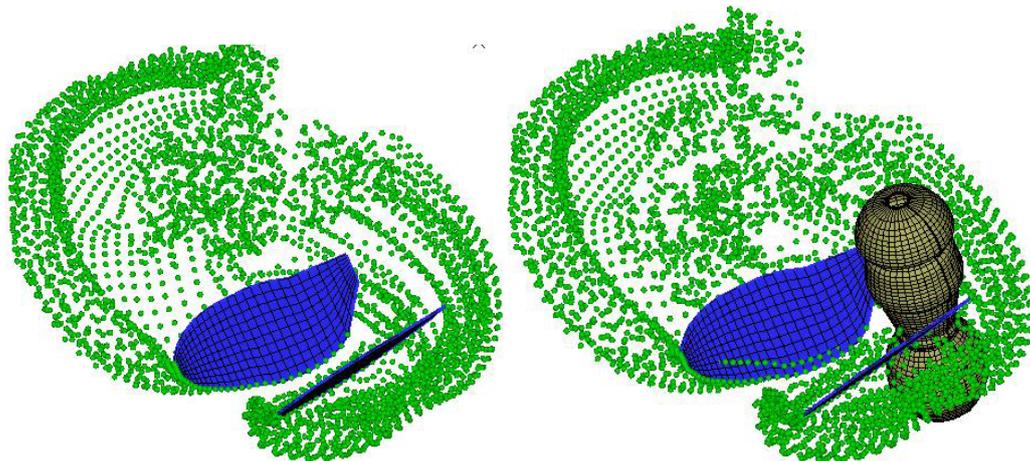
El análisis es realizado para tres configuraciones diferentes de vuelo. En primer lugar se estudia el insecto efectuando una maniobra conocida como *hover* (vuelo suspendido) sin corriente de aire. Luego se estudia al insecto efectuando la misma maniobra pero inmerso en una corriente de aire contenida en el



(a) Configuración de vuelo: hover (vuelo suspendido) sin corriente de aire.



(b) Configuración de vuelo: *hover* y corriente de aire a -45°



(c) Configuración de vuelo: *hover* y corriente de aire a -90°

Fig. 8. Forma de la estela para las diferentes condiciones de vuelo cuando $t = \frac{1}{2} T_f$

plano XY que incide, primero, a -45° y, en segundo lugar, a -90° con respecto al versor asociado a la coordenada x (ver Fig. 8).

Para cada una de las situaciones descritas anteriormente se presentan gráficos que muestran la evolución temporal de las estelas que se desprenden desde el borde de fuga y de la puntera de cada una de las dos alas, como así también, gráficos de la fuerza de sustentación, F_L , en función del tiempo. Todos estos resultados fueron obtenidos con la herramienta computacional desarrollada por los autores de este trabajo.

El código está escrito con Fortran 90, compilado para ser ejecutado en el sistema operativo Windows[®]. Los casos presentados en este esfuerzo se ejecutaron para un ciclo de batimiento. En promedio, el tiempo de ejecución fue aproximadamente de 24 horas en una computadora de escritorio con una memoria RAM DDR2 de 2 Gb y un procesador con una velocidad de reloj de 3 GHz, con tecnología HT, un bus frontal de 800 MHz y memoria cache de 2 Mb.

4.1. Evolución temporal de la estela

En la Fig. 8 se muestra gráficamente la evolución temporal de la estela para cada uno de los casos de estudio, considerando y no considerando el cuerpo del insecto. En color verde se muestran las partículas de fluido desprendidas desde los bordes de fuga. En esa figura, T_f es el período de un ciclo de batimiento. Como se puede apreciar, el método implementado capta con gran detalle las interacciones aerodinámicas estelas/estelas, alas/estelas y cuerpo/estelas.

4.2. Fuerza de sustentación

En la Fig. 9 se muestran tres gráficos de la evolución de la fuerza de sustentación, F_L , versus el tiempo adimensionalizado con respecto al período de un ciclo de batimiento para cada configuración de vuelo estudiada en este trabajo. Cada gráfico contiene dos curvas de F_L : *i*) considerando la influencia del cuerpo (línea color rojo y a trazos) y *ii*) ignorando la influencia del cuerpo del insecto (línea color azul y llena).

En los tres gráficos de la Fig. 9 se puede apreciar claramente que la influencia del cuerpo del insecto en el valor de la fuerza de sustentación, para vuelo suspendido con o sin corriente de aire, es muy baja. Sin embargo, este trabajo constituye un primer intento de determinar la importancia de la presencia del cuerpo en la producción de fuerzas de sustentación; sin duda para obtener una conclusión general sobre el tema deberían considerarse otras condiciones de vuelo como por ejemplo, vuelo hacia delante, vuelo lateral, o maniobras en la que el cuerpo tenga movimientos de traslación y/o de rotación prescriptos.

Con referencia a la forma que tienen las curvas en los tres gráficos, se puede observar la existencia de un aumento en la sustentación al comienzo de cada mitad del ciclo de aleteo o *half-stroke*. Este aumento se produce justo en el momento en el que el ala rota sobre su eje longitudinal e invierte su dirección de movimiento (*pronation/supination*). Este comportamiento está asociado a los mecanismos aerodinámicos no convencionales que dependen de la fase rotacional del ciclo de batimiento, tales como la sustentación rotacional y la captura de la estela descritos anteriormente. Por otro lado puede observarse que el ángulo de rotación toma valores relativamente grandes durante el *downstroke/upstroke*, esta es una característica intrínseca del vuelo con alas batientes y desde el punto de vista de la aerodinámica clásica dicho vehículo volador sufriría el fenómeno de pérdida. Dicho fenómeno de entrada en pérdida es retrasado debido a las

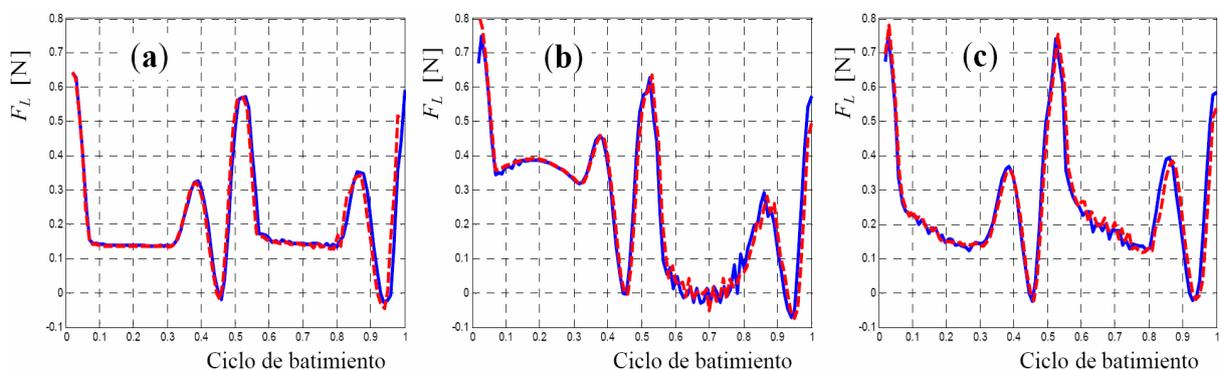


Fig. 9. Fuerza de sustentación para diferentes configuraciones de vuelo (a) *hover* (vuelo suspendido); (b) *hover* con una corriente de aire a -45° ; y (c) *hover* con una corriente de aire a -90° .

frecuencias de batimiento relativamente altas que caracterizan a la mayoría de los insectos voladores y algunas aves pequeñas tales como el colibrí. Este mecanismo no-estacionario es conocido con el nombre de retraso de la pérdida dinámica (*delayed stall*) y es el responsable de las grandes fuerzas de sustentación generadas durante la etapa de movimiento traslacional del ala.

5. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

En este trabajo se presentó una herramienta computacional (aun en desarrollo) muy versátil, basada en una ampliación y modificación del método de red de vórtices inestacionario y no-lineal en su versión tridimensional. El código elaborado es flexible y permite el ingreso de diferentes patrones cinemáticos y diferentes geometrías para el cuerpo y las alas de un insecto posibilitando de esta manera, un estudio integral de la aerodinámica asociada a las alas batientes.

El modelo aerodinámico empleado permitió captar de manera satisfactoria: *i*) la distribución espacio-temporal de la vorticidad asociada a la sábana vorticiosa adherida al ala, *ii*) la distribución de vorticidad y la forma de las estelas y *iii*) la interacción aerodinámica entre todas las estelas que se desprenden de las alas durante los ciclos de batimiento, entre las estelas y las alas, y entre la estelas y el cuerpo del insecto.

Se encontró que para una configuración de vuelo suspendido (*hover*) en la que puede haber una corriente de aire en una dirección arbitraria, la influencia del cuerpo del insecto en el cálculo de la fuerza de sustentación es mínima. Este resultado es importante desde el punto de vista computacional debido a que permitiría disminuir los tiempos de simulación despreciando el cuerpo del insecto sin perder fidelidad en el cálculo de las cargas aerodinámicas.

Actualmente se está trabajando en el desarrollo de un modelo dinámico multicuerpo para el insecto completo, que una vez terminado, se lo acoplará con el modelo aerodinámico presentado en este trabajo. Esta nueva herramienta permitirá estudiar la aeroelasticidad de insectos y aves pequeñas en diferentes configuraciones de vuelo y para diferentes patrones de movimiento de las alas, y utilizar estos resultados para diseñar micro-vehículos aéreos de alas batientes inspirados en la biología.

REFERENCIAS

- [1] Gordon, J., *The New Science of Strong Materials, or Why You Don't Fall Through the Floor*, 2nd Edition, Pelican-Penguin, London (1976)
- [2] Michelson, R.C., Naqvi, M.A., "Beyond biologically-inspired insect flight", Low RE Aerodynamics on Aircraft Including applications in Emerging UAV Technology RTO-AVT von Karman Institute for Fluid Dynamics Lecture (2003)
- [3] Mueller, T., Delaurier, J.D., "An overview of micro air vehicle aerodynamics", *Progress in Astronautics and Aeronautics*, **195**, 1-10 (2001)
- [4] Galiński, C., Żbikowski, R., "Some problems of micro air vehicles development", *Bulletin of the polish Academy of Sciences Technical Sciences*, **55**(1), 91-98 (2007)
- [5] Ellington, C.P., "The aerodynamics of hovering insect flight. IV. Aerodynamics Mechanisms", *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, **305**(1122), 79-113 (1984)
- [6] Van den Berg, C., Ellington, C., "The three-dimensional leading-edge vortex of a 'hovering' model hawkmoth", *Philosophical Transaction Royal Society London B*, **352**, 329-340 (1997)
- [7] Ellington, C.P., "The novel aerodynamics of insect flight: applications to micro-air vehicles", *Journal of Experimental Biology*, **202**(23), 3439-3448 (1999)
- [8] Usherwood, J.R., Ellington, C.P., "The Aerodynamics of Revolving Wings I. Model Hawkmoth Wings", *Journal of Experimental biology*, **205**, 1547-1564 (2002)
- [9] Dickinson, M.H., "The effect of wing rotation on unsteady aerodynamic performance at low Reynolds numbers", *The Journal of Experimental Biology*, **192**, 179-206 (1994)
- [10] Dickinson, M.H., Lehmann, F.O., Sane, S.P., "Wing rotation and the aerodynamic basis of insect flight", *Science*, **284**, 1954-1960 (1999)

- [11] Lehmann, F.-O., Pick, S., “The aerodynamic benefit of wing–wing interaction depends on stroke trajectory in flapping insect wings”, *Journal of Experimental Biology*, **210**, 1362-1377 (2007)
- [12] Weis-Fogh, T., “Quick estimates of flight fitness in hovering animals, including novel mechanisms for lift production”, *Journal of Experimental Biology*, **59**, 169-230 (1973)
- [13] Sane, S., “The aerodynamics of insect flight”, *The Journal of Experimental Biology*, **206**, 4191-4208 (2003)
- [14] Lehmann, F.-O., “The mechanisms of lift enhancement in insect flight”, *Naturwissenschaften*, **91**, 101-122 (2004)
- [15] Vest, M., Katz, J., “Unsteady Aerodynamic Model of Flapping Wings”, *AIAA Journal*, **34**(7), 1435-1440 (1996)
- [16] Ramamurti, R., Sandberg, W.C., “A Three-dimensional computational study of the aerodynamic mechanisms of insect flight”, *Journal of Experimental Biology*, **205**, 1507-1518 (2002)
- [17] Ansari, S.A., Żbikowski, R., Knowles, K., “Non-linear unsteady aerodynamics model for insect-like flapping wings in the hover. Part 2: implementation and validation”, *Aerospace Engineering*, **220**, 169-186 (2006)
- [18] Sane, S.P., Dickinson, M., “The control of flight fore by a flapping wing: Lift and drag production”, *The Journal of Experimental Biology*, **204**, 2607-2626 (2001)
- [19] Roccia, B.A., Preidikman, S., Massa, J.C., “De la biología a los insectos robots: Desarrollo de un código computacional interactivo para estudiar la cinemática de alas batientes”, *Mecánica Computacional*, **17**, 3041-3058 (2008)
- [20] Weis-Fogh, T., Jensen, M., “Biology and physics of locust flight: I. Basics principles in insects flight. A critical review”, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, **239**, 415-458 (1956)
- [21] Dickinson, M.H., “Solving the mystery of insect flight”, *Scientific American*, **284**(6), 48-57 (2001)
- [22] Markow, T., O’Grady, P., *Drosophila: A Guide to Species Identification and Use*, Elsevier Inc., San Diego, California (2006)
- [23] Konstadinopoulos, P., Mook, D.T., Nayfeh, A.H., “A numerical method for general unsteady aerodynamics”, AIAA-81-1877. AIAA Atmospheric Flight Mechanics Conference, August 19-21, Albuquerque, New Mexico (1981)
- [24] Preidikman, S., Numerical simulations of interactions among aerodynamics, structural dynamics, and control Systems, Ph.D. Dissertation, Department of Engineering Science and Mechanics, Virginia Tech (1998)
- [25] Batchelor, G.K., *An Introduction to Fluid Dynamics*, Cambridge University Press, Cambridge, UK (1967)
- [26] Majda, A.J., Bertozzi, A.L., *Vorticity and Incompressible Flow*, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom (2002)
- [27] Caflich, R., Orellana, O., “Singular solutions and ill-posedness of the evolution of vortex sheets”, *SIAM Journal on Mathematical Analysis*, **20**, 417-430 (1989)
- [28] Krasny, R., “A study of singularity formation in a vortex sheet by the point-vortex approximation”, *Journal of Fluid Mechanics*, **167**, 65-93 (1986)

TITLE UNSTEADY AND NONLINEAR AERODYNAMICS OF FLAPPING- WINGS MICRO-AIR-VEHICLES INSPIRED BY BIOLOGY

Abstract – This paper presents the development of a numerical simulation tool to study the unsteady and nonlinear aerodynamics of flying insects and small birds. This effort is intended to address the development of micro-air-vehicles through simulation data, fluid-structure models, and control schemes and development of simulation algorithms that can be used to study biologically inspired designs of flapping wing apparatus. The kinematics of the “natural flight” involves, at the same time, the wing-beat cycle of alternating downstroke and upstroke, wing oscillations, and significant changes in the effective angle of attack. The aerodynamic model adopted in this work is a modified 3D version of the “unsteady vortex lattice method”, a generalization of the well known “vortex lattice method”, which is widely used in steady and incompressible flows. The model allows taking into account unsteady behavior, aerodynamic nonlinearities associated with large angles of attack and large wing displacements, static deformations, and vorticity-dominated flows. The present study analyzes the influence of the insect’s body on the generation of lift for different flight configurations; e.g., hover, with and without the presence of air flow at an arbitrary incidence direction. The kinematics utilized to prescribe the

wing motion was developed by Dickinson to move a dynamically scaled robot (Robofly). The combination of the kinematic model and the aerodynamic model, along with a pre-processor to generate the insect geometry (body and wings) gives rise to a powerful computational tool. It allows to: use several kinematics patterns to move the wings; define, in an interactive way, different geometries for the insect; predict the fluid-motion field around the structure of the insect's body and insect's wings; estimate the spatial-temporal vorticity distribution attached to the insect's body and insect's wings; estimate the vorticity distribution in, and the position and shape of the wakes emitted from the sharp edges of the wings, predict the aerodynamic loads acting on the wings, and take into account all possible aerodynamics interferences.

Keywords – Unsteady and nonlinear aerodynamics, Flapping wings, Micro-air-vehicles, Bio-inspiration.