

UNA REVISIÓN DE LOS DIFERENTES MODELOS ESTRUCTURALES PARA ALAS BATIENTES DE MICRO-VEHÍCULOS AÉREOS

Mauricio A. Giordano^a, Sergio Preidikman^{a,b} y Julio C. Massa^a

^aFacultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba, Casilla de Correo 916, 5000 Córdoba, Argentina, maurigor@hotmail.com, <http://www.efn.uncor.edu>

^bCONICET - Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Av. Rivadavia 1917, Buenos Aires, Argentina, spreidikman@efn.uncor.edu, <http://www.conicet.gov.ar>

Palabras clave: Alas batientes, Modelos estructurales, Micro-vehículos aéreos.

Resumen. El objetivo principal de este artículo es presentar una revisión de los distintos modelos estructurales que han sido usados para representar el comportamiento de las alas batientes de micro-vehículos aéreos (MAVs). En la primera parte del trabajo, se presenta información general acerca del estado del arte de los MAVs. Si bien existen diversos tipos de MAVs, este artículo se basa en los modelos de alas que pueden ser aplicados en MAVs de alas batientes. Durante las últimas dos décadas, el desarrollo de estos MAVs ha atraído el interés de científicos de distintas áreas debido a sus interesantes aplicaciones tanto civiles como militares. El diseño de estos MAVs está inspirado en insectos y aves pequeñas ya que estas criaturas desarrollan extraordinarias capacidades de vuelo. Las pequeñas longitudes características que caracterizan a estos vehículos junto con el movimiento batiente de sus alas dan lugar a flujos de bajo número de Reynolds y consecuentemente los mecanismos de vuelo difieren mucho respecto a los presentes en la teoría aerodinámica clásica. Una práctica habitual para poder establecer criterios en cuanto a la importancia relativa de los fenómenos que intervienen durante el vuelo de los insectos, es realizar simulaciones numéricas. Con el fin de que éstas sean de utilidad en el diseño de MAVs deben representar la realidad física de una manera fiel y, necesariamente incluir, la interacción que ocurre entre los fenómenos aerodinámicos y el comportamiento estructural de las alas. De hecho, en estas interacciones se encuentra la explicación a algunos de los mecanismos especiales de generación de sustentación que tienen lugar en el vuelo de algunos insectos y otras criaturas voladoras. Los modelos estructurales para alas de insectos, que han sido documentados en la literatura especializada, van desde simples modelos físicos hasta complejas formulaciones numéricas; en el medio se encuentran simples aproximaciones basadas en aproximaciones analíticas. En los simples modelos físicos, como en los analíticos, se pierde generalidad debido a que se limitan exclusivamente a las geometrías sencillas para los que fueron especialmente desarrollados. Entre las técnicas numéricas, el método de elementos finitos es el más utilizado para resolver este tipo de problemas dado que permite incluir en su formulación geometrías complejas, variaciones espaciales de las propiedades, comportamiento no-lineal y control de la dinámica de la estructura. En esta revisión se presentan algunos modelos pertenecientes a los diversos enfoques mencionados anteriormente junto con sus limitaciones y las hipótesis asumidas para su formulación.

1 INTRODUCCIÓN

Los micro-vehículos aéreos son robots, con una dimensión máxima de 15 cm, capaces de desarrollar capacidades de vuelo. Científicos de diferentes áreas de la ciencia (biología, zoología, ingeniería, etc.) se han interesado a lo largo de las pasadas dos décadas en la creación de tales robots debido a las importantes aplicaciones que pueden ofrecer, tales como: monitoreo de espacios, vigilancia, exploración y, hasta incluso, participar en tareas de rescate.

A causa de las pequeñas longitudes características presentes en el diseño de los MAVs, el régimen de flujo generado durante el vuelo está caracterizado por un número de Reynolds pequeño (del orden $\sim 10^5$, o inferior). Contrariamente, el flujo alrededor de las alas de los aviones está caracterizado por un alto número de Reynolds debido a las grandes longitudes y velocidades características. Además de esta gran diferencia en el orden de magnitud del número de Reynolds, cuando se considera MAVs de alas flexibles y batientes se presenta un problema radicalmente distinto al de la clásica teoría aerodinámica y, por ende, los mecanismos de generación de sustentación y empuje cambian considerablemente.

La alta performance de vuelo de los insectos motivó a muchos científicos a centrar su investigación en dilucidar la mecánica del vuelo de los insectos yendo desde la cinemática asociada a su cuerpo y al movimiento de sus alas, pasando por la aerodinámica y el comportamiento estructural de sus alas flexibles. Un estudio bastante exhaustivo en estos temas fue presentado por Ellington en una serie de trabajos publicados en la década de los 80 para describir de manera bastante general el caso de insectos que se mantienen suspendidos en el aire (hovering) (Ellington, 1984a, b, c, d, e, f). Mediante filmaciones individuales realizadas a insectos dentro de una cámara de filmación ese investigador pudo realizar un relevamiento de la cinemática de una de las alas con respecto a un sistema de coordenadas fijo a la cámara. Todos los parámetros que definen la cinemática son definidos respecto de sistemas de coordenadas fijos al insecto y existen convenciones y una cierta terminología para definirlos (Sane, 2003).

En los trabajos citados de Ellington se presenta una revisión de los mecanismos particulares de generación de sustentación desarrollados en alas batientes, pero en ese entonces había gran incertidumbre en cuanto a la veracidad de las predicciones teóricas debido que se trabajaba con modelos extremadamente simplificados. Se consideraban elementos de ala de un espesor diferencial y modelos 2-D. Uno de los primeros aportes al estudio de la aerodinámica aplicada al vuelo de insectos fue el realizado por (Osborne, 1951) quien con su formulación de la aerodinámica del problema, y junto con la cinemática ya conocida de veinticinco insectos, fue capaz de establecer valores promedios de los coeficientes de sustentación y de arrastre. La limitación de estos modelos es que no permiten calcular las fuerzas instantáneas sobre las alas; más bien ofrecen la posibilidad de establecer un valor promedio de las mismas y estimar la potencia necesaria. Dentro de estos modelos analíticos recién mencionados, el más distinguido es el modelo de vórtices (Rayner, 1979b, a; Ellington, 1984e).

Una mejora por sobre el método de vórtices para describir la aerodinámica tiene su origen en los métodos que se conocen en la literatura con el nombre de casi-estáticos. Éstos métodos permiten obtener soluciones analíticas al problema simplificado del vuelo de insectos argumentando que las fuerzas aerodinámicas instantáneas en un ala batiente es la misma que la de un ala moviéndose a la velocidad correspondiente al instante considerado y con el mismo ángulo de ataque (Ellington, 1984a). De esta forma las fuerzas pueden calcularse en la sucesión deseada de instantáneas y así construir la evolución temporal de las fuerzas sobre las alas cuya dependencia temporal estaría establecida por la dependencia en el tiempo de la

cinemática más que por el flujo del aire en sí. Los resultados obtenidos con este método casi-estático para el empuje resultan insuficientes para soportar el peso del insecto, con lo cual esta teoría fue sujeta a cuestionamientos y varios trabajos más recientes confirman su ineptitud (Ennos, 1989b; Dudley, 1990; Zanker and Gotz, 1990).

El avance de la tecnología, y en particular, la relacionada con la capacidad de cálculo con computadoras hizo posible resolver el campo de velocidades inducido por el vuelo de insectos con menos simplificaciones que las utilizadas en los modelos citados anteriormente mediante el uso de métodos numéricos (área computacional conocida con el nombre de *Computational Fluid Dynamics*, CFD) (Smith et al., 1996; Liu et al., 1998; Liu and Kawachi, 1998; Ramamurti and Sandberg, 2002; Sun and Tang, 2002). En estos trabajos se encuentran resultados numéricos del flujo alrededor de las alas batientes considerando modelos 2-D y 3-D algunos de ellos obtenidos directamente de una discretización directa de las ecuaciones completas de Navier-Stokes (Liu et al., 1998; Liu and Kawachi, 1998). Estas simulaciones implican un alto "costo" computacional aunque, como ya se mencionó, los grandes avances en la capacidad de cálculo permiten el planteo y resolución de problemas cada vez más audaces.

Para validar los resultados obtenidos para las cargas aerodinámicas (por cualquiera de las técnicas utilizadas en las referencias arriba citadas) se ha recurrido a la creación de modelos físicos de las alas respetando un escalado dinámico (básicamente implica igualdad del número de Reynolds y frecuencia reducida) basados en el hecho de que es más fácil medir las propiedades del flujo alrededor de estos modelos a escala que hacer lo propio directamente sobre insectos. Algunos de estos modelos mecánicos han probado su utilidad en la identificación de varios mecanismos de generación de sustentación (Dickinson and Gotz, 1993; Ellington et al., 1996; Sane and Dickinson, 2002).

Cabe destacar que todos los resultados presentes en la literatura anteriormente citada fueron derivados considerando a las alas batientes como estrictamente rígidas, dejando la puerta abierta a la incorporación de un código para resolver la elasticidad del ala, dejando de lado la condición de rígida, y resolver interactivamente ambos campos, de velocidad del fluido y de deformación del ala.

Para una representación aún más aproximada de la realidad física del problema es menester utilizar alguno de los modelos aerodinámicos brevemente descriptos en los párrafos anteriores en conjunto con un modelo estructural del ala batiente permitiendo que ésta última se deforme por acción de las fuerzas aerodinámicas (i.e., las calculadas por el modelo aerodinámico) más las fuerzas inerciales, producto de las aceleraciones propias de la cinemática. He aquí donde surge la necesidad de desarrollar un modelo estructural para las alas y el motivo de esta revisión bibliográfica. De esta manera sería posible en trabajos posteriores incluir la interacción acoplada de la aerodinámica con las deformaciones de las alas. El susodicho acople se produce dado que la aerodinámica depende fuertemente de la configuración geométrica del ala y, a su vez, la configuración geométrica del ala como elemento deformable depende fuertemente de las cargas externas, esto es, las cargas aerodinámicas generadas en la interacción con el aire circundante.

Habiendo optado por un modelo aerodinámico y un modelo estructural puede desarrollarse un código computacional que permita realizar los cálculos de la interacción en el tiempo de ambos fenómenos y poder así describir más cabalmente el problema aeroelástico que involucra el vuelo de los insectos. El fin último sería establecer el diseño de un MAV utilizando los resultados obtenidos mediante el código computacional de manera que se aproxime a las performances observadas en los pequeños voladores naturales.

2 MODELOS ESTRUCTURALES DE LAS ALAS

Las alas de los insectos son estructuras de características impresionantes que consisten, típicamente, en extensiones de membrana sujetas a las venas. Dado que carecen de músculos internos, las propiedades de las mismas deben ser tales que, bajo la acción de las cargas de funcionamiento, se produce la configuración geométrica exacta desde el punto de vista aerodinámico. Todo cambio que experimentan en la forma es producido por fuerzas externas tales como la ejercida por los músculos de la zona torácica y las aerodinámicas que experimenta el ala. La diversidad de las alas de los insectos es bastante grande cambiando no solo la geometría sino la disposición y el tamaño de la red vascular.

Lo descrito en el párrafo anterior, sumado a que los componentes que constituyen las alas varían mucho de punto a punto (ancho de la membrana, diámetro de las venas, etc), hace evidente el hecho que la modelización de este tipo de estructuras es una tarea muy desafiante.

El desarrollo de los modelos ha seguido una línea bastante obvia en el sentido que los primeros pasos se dieron utilizando modelos analíticos sencillos (Ennos, 1988) y posteriormente se comenzaron a emplear modelos numéricos más completos basados en el método de elementos finitos (Combes and Daniel, 2003a, b; Mengesha et al., 2009). A continuación se presenta una revisión de los distintos modelos publicados para mostrar el tipo de modelos con los que se ha venido trabajando en el área de modelación las alas para MAVs, que no es exhaustiva pero describe el estado del arte.

2.1 Modelos Físicos

Incluir en un modelo físico todas las características de las alas de los insectos resultaría prácticamente imposible. Se ha recurrido entonces a la creación de modelos simplificados pero que han sido de gran utilidad para descifrar algunos interrogantes acerca de la mecánica de las alas.

A modo de ejemplo en la Figura 1 se muestra un modelo hecho en cartulina tomado de (Ennos, 1989a) que fue construido con el fin de explicar el mecanismo de depresión automática que ocurre en las alas de varios insectos (del grupo de los dípteros). Se demostró que éste mecanismo está asociado a una vena transversal llamada “*arculus*”. Se supuso que la carga aerodinámica levanta la región del ala soportada por ramas de una vena longitudinal articulada al *arculus*, llevando hacia abajo el borde de fuga y manteniendo una orientación y sección efectiva del ala, desde la perspectiva de la aerodinámica. Tomando alas reales se pudo comprobar la depresión que ocurre en el borde de fuga debido a este mecanismo de transmisión de carga.

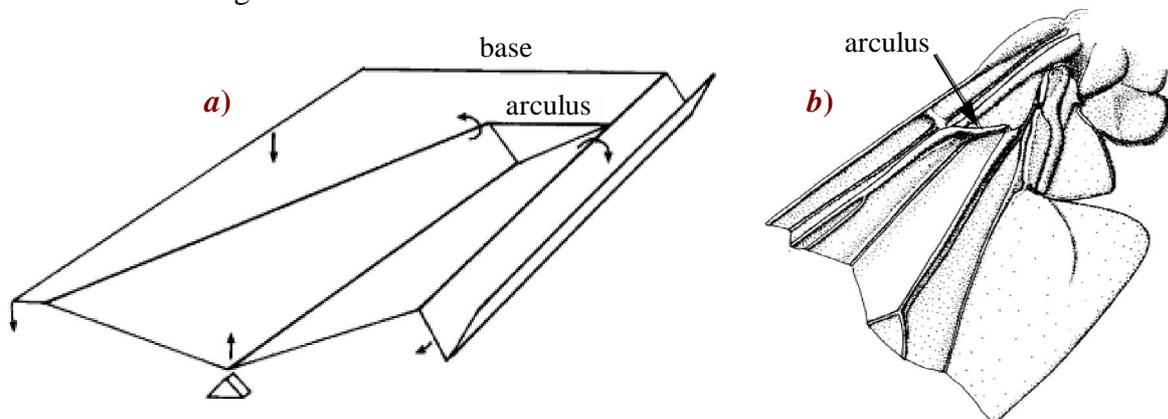


Figura 1: a) Modelo físico del ala creado en cartulina. Las flechas rectas representan las fuerzas aplicadas y las flechas curvas la rotación de los componentes del ala. b) Base del ala de un tábano, ilustrando al *arculus*; (Ennos, 1989a).

2.2 Modelos Analíticos

Muchos de los modelos analíticos surgen de la necesidad de describir matemáticamente los modelos físicos, tal como el presentado a modo de ejemplo en la Sección 2.1. En particular, para ése modelo se desarrolló una expresión analítica para la curvatura (Ennos, 1988):

$$\frac{h_{\max}}{Y} = \frac{\Psi Y}{4 \tan \Theta}, \quad (1)$$

donde h_{\max}/Y es la curvatura; h_{\max} es el desplazamiento máximo perpendicular al plano del ala, medido desde la posición indeformada; Y es la coordenada en la dirección de la cuerda del ala, medida desde el borde de ataque; Ψ es el ángulo de torsión por unidad de longitud; y Θ es el ángulo que forman las barras rigidizadoras con el borde de ataque.

La Ec. (1) representa el efecto que produce sobre la curvatura la pronación del borde de ataque y se determinó considerando que las barras son paralelas unas a otras y rígidas, de manera que pueda desprejiciarse la flexión. La forma resultante del ala sería similar a una parábola invertida, simétrica con respecto a una línea que une la mitad de las cuerdas. En ese mismo trabajo, Ennos demostró analíticamente que mientras el borde de fuga gira un cierto ángulo, las barras también lo hacen pero en sentido opuesto de manera que ante una pronación del borde de ataque estas barras estarían bajo una supinación.

Si las barras rigidizadoras fueran curvas en lugar de rectas, el máximo desplazamiento dejaría de situarse en la mitad de la cuerda y pasaría a ocurrir en algún punto entre el borde de ataque y la mitad de la cuerda. Para corroborar todos estos resultados, que obtuvo con expresiones analíticas, Ennos desarrolló un equipo y una técnica para hacer experimentos con alas frescas de insectos, aplicando cargas puntuales y midiendo los desplazamientos resultantes. Se obtuvo buen acuerdo de lo predicho por la teoría y lo medido en estos ensayos.

Otro modelo analítico es el desarrollado por (Haas and Wootton, 1996) para representar el plegado de las alas de insectos de la familia de los Coleoptera, Dermaptera y Blattodea. Para este caso también se desarrolló un modelo físico en cartulina. En esta investigación los autores descubrieron que el proceso de plegado de las alas de estos insectos es básicamente el resultado de dos mecanismos básicos a los que denominaron interno y externo, representados en la Figura 2. Nótese que cada modelo consiste de cuatro líneas de plegado que concurren a un mismo punto y con un solo grado de libertad geométrico que es el ángulo de plegado, ε . Utilizando análisis vectorial para encontrar una relación entre ε y la posición de la línea de plegado OC (Figura 2). Diferenciando esta relación respecto del tiempo encontraron una expresión para la velocidad de plegado, una subsecuente diferenciación permite representar los cambios en la relación de velocidades.

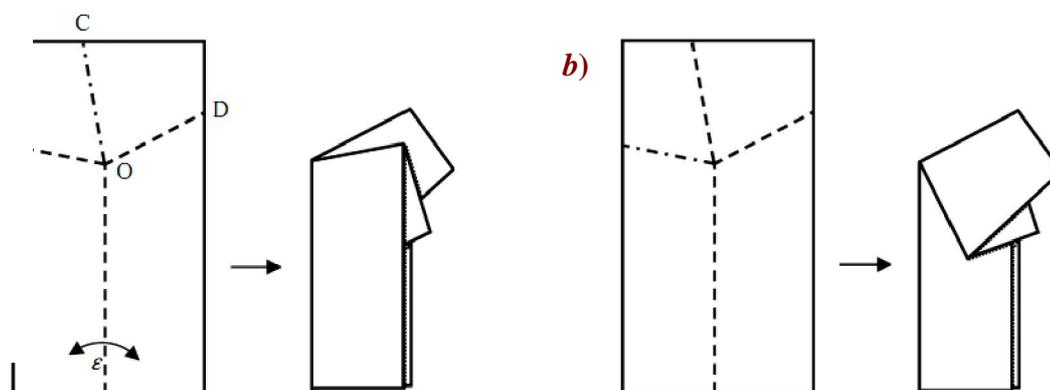


Figura 2: Proceso de plegado de las alas. a) Mecanismo interno. b) Mecanismo externo; (Haas and Wootton, 1996).

En la Figura 3 se muestra la relación de velocidades en función del ángulo ε para el mecanismo interno y el externo, siendo ambos geoméricamente similares y por ende, comparables. Notar que presentan comportamientos opuestos desde el punto de vista cinemático. En las alas reales de estas familias de insectos, dichos mecanismos ocurren sólo aproximadamente y se ha encontrado que el mecanismo denominado como interno se presenta en la región del ala cercana a la base.

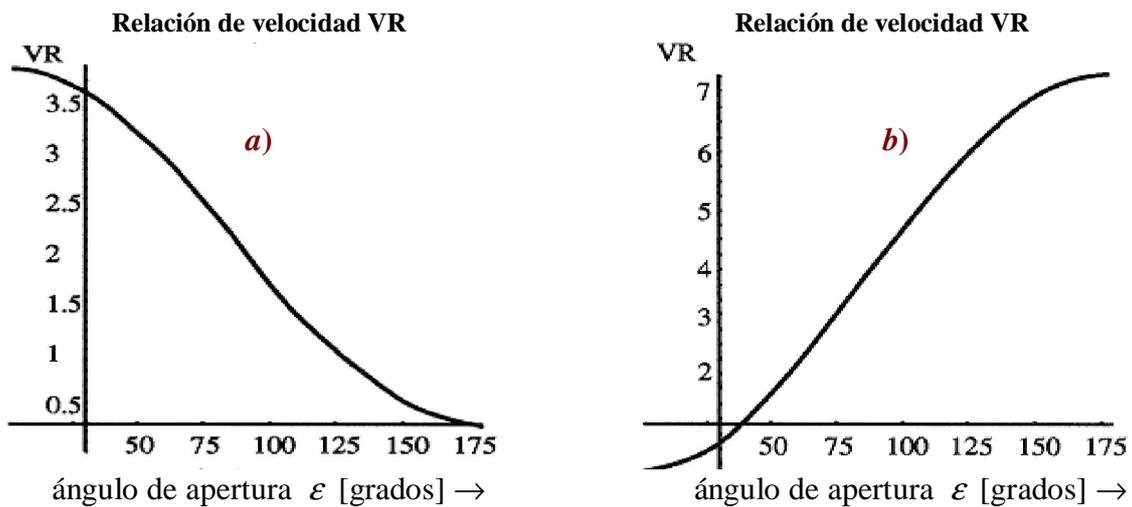


Figura 3: Relación de velocidad vs ángulo de apertura. a) en el mecanismo interno. b) en el mecanismo externo; (Haas and Wootton, 1996).

Los modelos analíticos como los citados arriba son de gran importancia a la hora de hacer análisis de sensibilidad de los distintos parámetros que intervienen en el fenómeno que describen y tienen la ventaja de ser bastante sencillos y rápidos de formular. Sin embargo, es importante tener siempre presente que simplifican mucho la geometría del ala y, como puede verse en los artículos referenciados, ignoran tanto las propiedades de los materiales como la magnitud real de las fuerzas que actúan sobre las alas reales.

2.3 Modelos Numéricos

Como se ha dicho, los métodos numéricos acompañados con la mejora en las capacidades de cálculo de las computadoras actuales permiten plantear y resolver modelos mucho más audaces y ambiciosos que los analíticos. La creación de un modelo numérico completo implica conocer detalles acerca de: la geometría, las propiedades de los materiales, las condiciones de borde, las cargas. Además, una vez adoptado un modelo para las grandes deformaciones no lineales, el mismo debe ser incorporado al modelo numérico. En el proceso de definir todas estas cuestiones radica la dificultad de la modelación numérica. De las técnicas numéricas disponibles, el método de los elementos finitos (FEM) ha alcanzado un alto grado de desarrollo en el área estructural y es el elegido en forma excluyente por los investigadores que han estado trabajando en los modelos estructurales discutidos en este trabajo.

Una de las primeras publicaciones que muestra la utilización del FEM aplicado a las alas de insectos corresponde a (Kesel et al., 1998). En este trabajo se realizó un modelo estructural para cuantificar las deformaciones en respuesta a cargas que representan las aerodinámicas (supuestas conocidas). La geometría se basa en un ala de una Odonata (*Aeshna cynea*) y se la consideró empotrada en la base y con las venas consideradas como un marco. En el modelo la membrana se representa con elementos tipo cáscara (shell elements) y las venas como

elementos tipo tuberías (pipe elements). El análisis por elementos finitos fue realizado con la ayuda de ANSYS 5.0A y se pudo establecer el rol de las venas secundarias en cuanto a la estabilidad general de la estructura, como así también restringiendo la posibilidad de pandeo local; el análisis no-lineal reveló la importancia del endurecimiento por tensión en cuanto a la estabilidad de la estructura del ala de insectos con gran proporción de área de membrana.

En la literatura se reporta una serie bastante amplia de análisis por el FEM. Entre ellos cabe citar el realizado por (Combes and Daniel, 2003a) donde utilizaron el FEM para analizar la contribución de las venas a la rigidez flexional del ala de una *Manduca sexta*. A este fin realizaron un modelo bastante simplificado (sin curvatura) de elementos de cáscara de espesor constante dispuestos de manera de reproducir la forma y la configuración de las venas (Figura 4) argumentando que sólo buscaban caracterizar la influencia, desde el punto de vista de la rigidez flexional global, del agregado de venas en ciertas regiones.

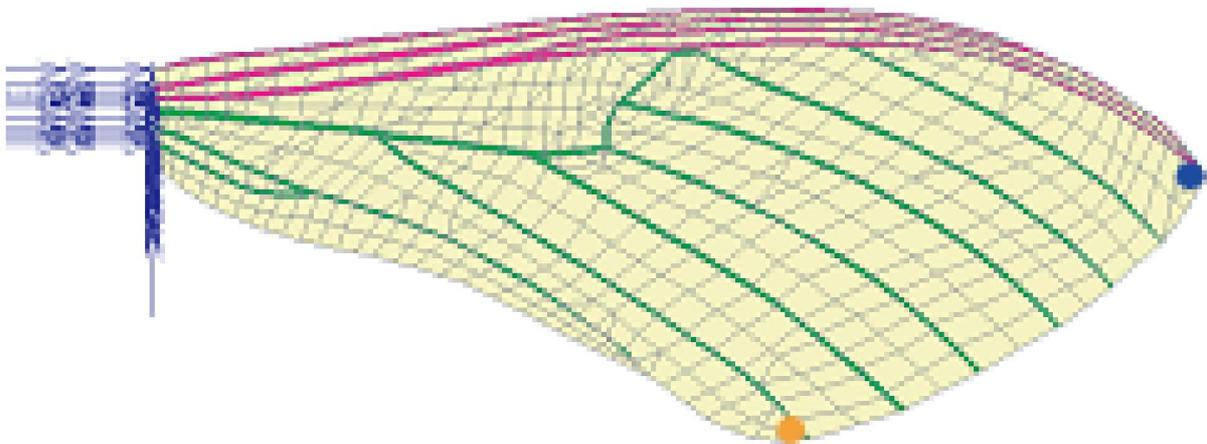


Figura 4: Modelo en elementos finitos basado en el ala de una *Manduca sexta*. En rosa: elementos de viga representando las venas del borde de ataque; en verde: venas fuera del borde de ataque; en amarillo: elementos de cáscara modelando la membrana; (Combes and Daniel, 2003a).

En un trabajo posterior (Combes and Daniel, 2003b) utilizaron el FEM para analizar cómo se ve afectada la flexión del ala debido a la variación de la rigidez flexional. Basándose en dos modelos geoméricamente idénticos del ala de una *Manduca sexta* pero con diferencias significativas en el patrón de distribución de rigidez flexional (Figura 5) mostraron que la distribución de rigidez flexional medida en las alas delanteras de estos insectos es lo que preserva la rigidez en las zonas cercanas a la base al mismo tiempo que transfiere la flexión a los bordes donde la generación de fuerzas aerodinámicas es más sensible a cambios en la forma.

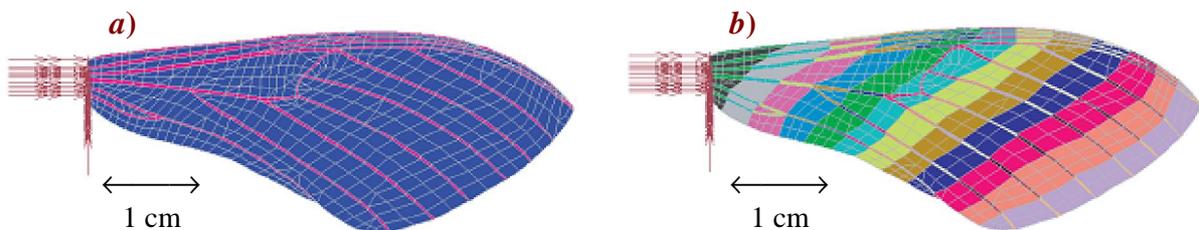


Figura 5: Modelos en elementos finitos basado en el ala de un *Manduca sexta*. a) Elementos de viga (rosa) y de membrana (azul) con propiedades homogéneas. b) Modelo donde el decaimiento de rigidez de la membrana y de las venas produce un decremento exponencial de la rigidez flexional en dirección base-punta; (Combes and Daniel, 2003b).

Recientemente Mengesha et al., (2009) publicaron un trabajo donde se describe una técnica general nes polinómicas. Dada la información completa de la distribución de las venas en el ala een forma paramétrica para el modelado estructural de las alas de los insectos basado en la fotografía digital y cómo crear el modelo de elementos finitos (FE) a partir de éstas fotografías. En primer lugar, bajo la técnica propuesta, se define la topología de la red vascular mediante el uso de unos diagramas parecidos a un polígono vectorial (digraphs) (Figura 6). Luego, utilizando curvas de Bézier se establece la forma de las venas y, para finalizar el relevamiento de la disposición vascular, se aproxima el tamaño de las mismas con funcios posible identificar las regiones en las cuales se extiende una membrana la cual está compuesta por varias celdas cerradas que a su vez son regiones encerradas por un conjunto de venas adyacentes.

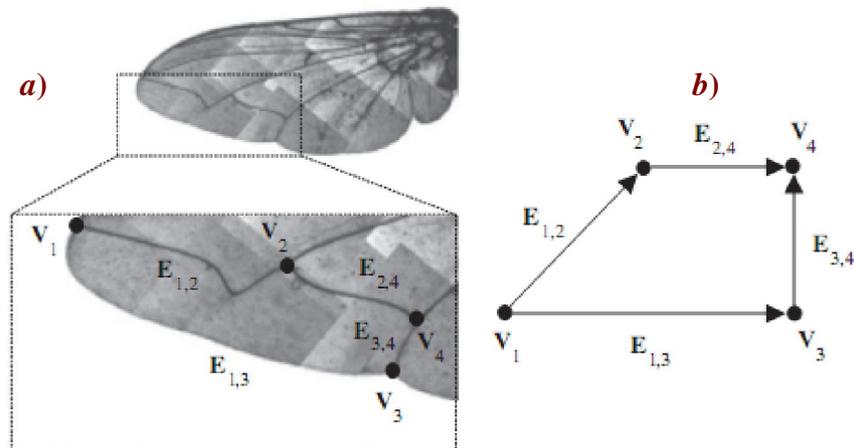


Figura 6: a) Imagen digital del ala de un Calliphoridae. b) 'Digraph' que representa la topología de las venas; (Mengesha et al., 2009).

En el trabajo de Mengesha mencionado en el párrafo anterior, junto con la metodología, se presenta una forma para almacenar toda la información respecto de las venas y las membranas de una manera útil para ser llevada a un programa de diseño o directamente para generar la geometría en un software de FE. Para ilustrar la técnica se presenta un caso de estudio para el ala de una *Cicada* donde utilizando el software FEMLAB 3.1TM se generó el modelo de FE a partir del modelo paramétrico de la geometría. Las venas se modelaron como elementos de viga de sección transversal circular variable longitudinalmente y la membrana como elementos de cáscara triangulares de espesor uniforme (Figura 7). El ala se supone empotrada al tórax del insecto. La técnica presentada en este trabajo resulta atractiva y está descrita en forma sistemática de manera de facilitar su aplicación a casos concretos.

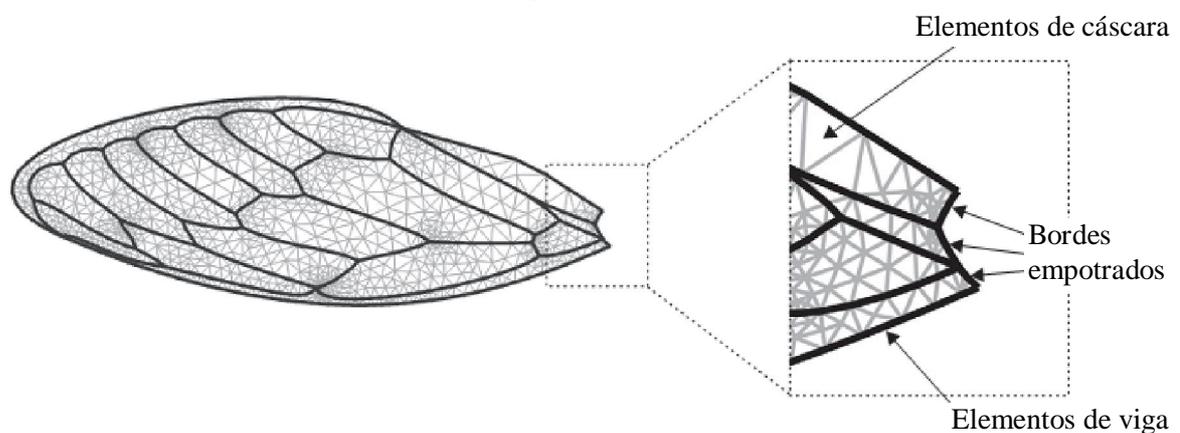


Figura 7: Modelo en elementos finitos del ala delantera de una *Cicada*; (Mengesha et al., 2009).

Para cerrar esta sección de revisión de modelos numéricos se puede decir que el FEM es una técnica muy potente para el estudio del comportamiento estructural de las alas de insectos. La complejidad proviene de la dificultad de describir la morfología del ala en una manera adecuada para la creación de la malla de FE con buen grado de precisión para representar la realidad. Para subsanar esta primera complicación se sugiere recurrir a distintas modalidades de imágenes (resonancia magnética, fotografías, etc). Otro problema es establecer las propiedades de los materiales que pueden ser dependientes tanto de las tasas de deformaciones como de las tasas de tensiones. Por último definir correctamente las condiciones de borde y las cargas provenientes de la aerodinámica no resulta en un trabajo trivial.

3 COMENTARIOS FINALES Y TRABAJOS FUTUROS

De la revisión presentada en este trabajo se desprende que el área que menos dedicación ha tenido, en cuanto al estudio y desarrollo de MAVs, es la del problema de considerar de manera completa el fenómeno de interacción fluido-estructura. El paso siguiente que debe tomar la investigación en esta área debe, entonces, estar orientado a la resolución en forma simultánea de los modelos aerodinámicos y estructurales. Una vez que se disponga de códigos que permitan resolver el problema completo de interacción fluido-estructura y se hallan comparado y confirmado su precisión contrastando mediciones realizadas experimentalmente sobre algunos insectos se estará en condiciones de utilizarlos para simular la performance de distintos diseños de MAVs. Todo lo anteriormente mencionado, lleva implícita la necesidad de conocer con precisión, entre otras, las propiedades de los materiales y la cinemática de las alas. A este respecto ya se dispone de varios estudios en la literatura (Ellington, 1984c; Song et al., 2004; Song et al., 2007).

REFERENCIAS

- Combes, S.A. and T.L. Daniel, Flexural stiffness in insect wings I. Scaling and the influence of wing venation. *J Exp Biol* 206: 2979-2987, 2003a
- Combes, S.A. and T.L. Daniel, Flexural stiffness in insect wings II. Spatial distribution and dynamic wing bending. *J Exp Biol* 206: 2989-2997, 2003b
- Dickinson, M.H. and K.G. Gotz, Unsteady aerodynamic performance of model wings at low Reynolds numbers. *J Exp Biol* 174: 45-64, 1993
- Dudley, R., Biomechanics of Flight in Neotropical Butterflies: Morphometrics and Kinematics. *J Exp Biol* 150: 37-53, 1990
- Ellington, C.P., The Aerodynamics of Hovering Insect Flight. I. The Quasi-Steady Analysis. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. B, Biological Sciences* 305: 1-15, 1984a
- Ellington, C.P., The Aerodynamics of Hovering Insect Flight. II. Morphological Parameters. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. B, Biological Sciences* 305: 17-40, 1984b
- Ellington, C.P., The Aerodynamics of Hovering Insect Flight. III. Kinematics. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. B, Biological Sciences* 305: 41-78, 1984c
- Ellington, C.P., The Aerodynamics of Hovering Insect Flight. IV. Aerodynamic Mechanisms. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. B, Biological Sciences* 305: 79-113, 1984d
- Ellington, C.P., The Aerodynamics of Hovering Insect Flight. V. A Vortex Theory. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. B, Biological Sciences* 305:

- 115-144, 1984e
- Ellington, C.P., The Aerodynamics of Hovering Insect Flight. VI. Lift and Power Requirements. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. B, Biological Sciences* 305: 145-181, 1984f
- Ellington, C.P., C. van den Berg, A.P. Willmott and A.L.R. Thomas, Leading-edge vortices in insect flight. *Nature* 384: 626-630, 1996
- Ennos, A.R., The importance of torsion in the design of insect wings. *J Exp Biol* 140: 137-160, 1988
- Ennos, A.R., Comparative functional morphology of the wings of Diptera. *Zoological Journal of the Linnean Society* 96: 27-47, 1989a
- Ennos, A.R., Inertial and aerodynamic torques on the wings of Diptera in flight. *J Exp Biol* 142: 87-95, 1989b
- Haas, F. and R.J. Wootton, Two Basic Mechanisms in Insect Wing Folding. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences* 263: 1651-1658, 1996
- Kesel, A.B., U. Philippi and W. Nachtigall, Biomechanical aspects of the insect wing: an analysis using the finite element method. *Computers in Biology and Medicine* 28: 423-437, 1998
- Liu, H., C.P. Ellington, K. Kawachi, C. Van Den Berg and A.P. Willmott, A computational fluid dynamic study of hawkmoth hovering. *J Exp Biol* 201: 461-477, 1998
- Liu, H. and K. Kawachi, A Numerical Study of Insect Flight. *Journal of Computational Physics* 146: 124-156, 1998
- Mengesha, T.E., R.R. Vallance, M. Barraja and R. Mittal, Parametric structural modeling of insect wings. *Bioinspiration & Biomimetics* 4: 036004, 2009
- Osborne, M.F.M., Aerodynamics of Flapping Flight with Application to Insects. *J Exp Biol* 28: 221-245, 1951
- Ramamurti, R. and W.C. Sandberg, A three-dimensional computational study of the aerodynamic mechanisms of insect flight. *J Exp Biol* 205: 1507-1518, 2002
- Rayner, J.M.V., A vortex theory of animal flight. Part 1. The vortex wake of a hovering animal. *Journal of Fluid Mechanics* 91: 697-730, 1979a
- Rayner, J.M.V., A vortex theory of animal flight. Part 2. The forward flight of birds. *Journal of Fluid Mechanics* 91: 731-763, 1979b
- Sane, S.P., The aerodynamics of insect flight. *J Exp Biol* 206: 4191-4208, 2003
- Sane, S.P. and M.H. Dickinson, The aerodynamic effects of wing rotation and a revised quasi-steady model of flapping flight. *J Exp Biol* 205: 1087-1096, 2002
- Smith, M., P. Wilkin and M. Williams, The advantages of an unsteady panel method in modelling the aerodynamic forces on rigid flapping wings. *J Exp Biol* 199: 1073-1083, 1996
- Song, F., K.L. Lee, A.K. Soh, F. Zhu and Y.L. Bai, Experimental studies of the material properties of the forewing of cicada (Homoptera, Cicadidae). *J Exp Biol* 207: 3035-3042, 2004
- Song, F., K.W. Xiao, K. Bai and Y.L. Bai, Microstructure and nanomechanical properties of the wing membrane of dragonfly. *Materials Science and Engineering: A* 457: 254-260, 2007
- Sun, M. and J. Tang, Unsteady aerodynamic force generation by a model fruit fly wing in flapping motion. *J Exp Biol* 205: 55-70, 2002
- Zanker, J.M. and K.G. Gotz, The Wing Beat of *Drosophila Melanogaster*. II. Dynamics. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. B, Biological Sciences* 327: 19-44, 1990