

EL VUELO DE LAS LIBÉLULAS Y SU UTILIZACIÓN EN LA TECNOLOGÍA

H. Barrera-Escorcía¹; M. P. Villeda-Callejas²; J. A. Lara-Vázquez²

Laboratorio de Biología Celular¹, Laboratorio de Zoología²; FES-Iztacala, UNAM.
Av. de los Barrios Núm. 1, Los Reyes Iztacala. C. P. 54090

RESUMEN

Siempre ha llamado la atención el ágil y vigoroso vuelo de las libélulas, razón por la que ha despertado el interés de estudiar las características de las alas, los músculos, la relación de éstos con la pared del tórax, lo cual se ha utilizado como un modelo en la aeronáutica y la robótica.

PALABRAS CLAVE: odonata, movimiento de las alas, ultraestructura de las alas, tecnología aeronáutica.

THE FLIGHT OF THE DRAGONFLIES AND IT'S TECHNOLOGICAL USES

SUMMARY

Dragonflies' flight, characterized by its peculiar pace and strength, has developed a particular interest in the study of their thoracic muscular structure and it's wings' constitution and shape. Due to these features, the advances in the analysis of their flight have significantly contributed to aeronautical and robotic technology.

KEY WORDS: odonata, wings movement, wing's ultra structure, aeronautic technology

INTRODUCCIÓN

Durante muchos años, el vuelo de estos sorprendentes insectos ha intrigado a los investigadores, debido a la gran capacidad que muestran en sus hazañas acrobáticas que, entre otras actividades, les sirven para reproducirse y alimentarse (Martinov, 1924). Pueden volar hacia delante y hacia atrás, lo mismo que subir, bajar, detenerse abruptamente y acelerar hasta alcanzar $98 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$.

Las libélulas no son capaces de plegar sus alas hacia los costados como la mayoría de los insectos, por lo que se consideran como "seres primitivos", pero su forma de vuelo no tiene nada primitivo; a diferencia de otros insectos que tienen solamente un par de alas, estos organismos tienen dos pares de alas, las delanteras se mueven a diferente velocidad que las traseras, capacidad que les permite permanecer inmóviles o desplazarse inmediatamente a gran velocidad; los violentos giros que realizan hacen que sus alas choquen entre sí y produzcan un sonido característico. Las alas se proyectan hacia ambos lados del tórax y forman parte del exoesqueleto, tienen

una disposición de las vénulas muy bien definidas, característica que ayuda al reconocimiento de las diversas especies (Miller, 1987).

Las alas de las libélulas tienen importancia, desde el punto de vista taxonómico, ya que su incapacidad para plegarlas las ubica dentro de los Paleópteros, a diferencia de los Neópteros que si lo pueden hacer. Dentro del primer grupo, están los que se les denomina comúnmente como "caballitos del diablo", cuyas alas tienen una venación muy compleja (Henning, 1981); este grupo primitivo evolucionó probablemente en las regiones tropicales, hace 250-300 millones de años, durante el Carbonífero, a partir de formas ancestrales gigantes que llegaron a alcanzar dimensiones colosales, como *Stenophlebia aqualis*, una libélula gigante encontrada en la caliza de Solnhofen, Baviera, es uno de los insectos fósiles más grandes y mejor conservados con una envergadura de 75 cm de extremo a extremo de las alas (8). Además de su enorme tamaño difieren de los modernos caballitos del diablo en varios aspectos, como la carencia del "nodus", que es una vena transversal que

divide el ala a la mitad, y del pterostigma, que es la celda de color oscuro y ligeramente más engrosado, localizado en el extremo antero apical; la distribución de venas era generalmente más primitiva.

Las alas tienen una consistencia membranosa, hialina, altamente nervadas, y en algunos casos, presentan grandes áreas pigmentadas o coloreadas; en ellas se observa una marcada tendencia a la peciolación; es decir, un angostamiento en la base de las alas. Constantemente se hace referencia a esta peciolación, cuando se discute sobre la filogenia del grupo, y es una característica que aparece frecuentemente en las claves de determinación. Considerando al mayor grado de peciolación de las alas como una característica primitiva, se cuenta con dos subórdenes principales: los Anisoptera, cuyas alas se mantienen horizontales cuando están en reposo y cuyas alas posteriores son más anchas en la base que las anteriores, y los Zygoptera, que mantienen sus alas plegadas verticalmente sobre el cuerpo, las alas anteriores y posteriores son iguales en forma y tamaño, angostadas hacia la base y expandidas hacia el extremo distal (González, 1997).

La distribución de las venas es longitudinal, transversal y con reticulaciones secundarias; el pterostigma es de color negro, café o amarillento; la nomenclatura que se utiliza puede variar de un autor a otro. Las alas no están unidas al tórax en su base por escleritos u otras estructuras como en otros insectos, aunque sus movimientos en el vuelo son claramente coordinados.

La terminología que se utiliza para asignar el nombre a las venas de las alas de los odonatos ha variado a lo largo del tiempo, de acuerdo con diversos autores; sin embargo, la que aparece en la Figura 1 es la que utiliza Needham (1975) como sigue: Costa (C), Subcosta (Sc), Radio (R), Media 1 (M 1), Cubital 1 (Cu 1), Anal 1 (A 1), arculus (ar), Nodus (n), antenodal (an), postnodal (pn), pterostigma (st), vena del puente (br), vena anal que cruza (Ac), triángulo (T), subtriángulo (s), interespacio trigonal (tr), asa anal (alp) (1).

Ultraestructura de las alas

Generalmente, las alas de estos insectos tienen ciertos patrones de coloración que sirven para diversas funciones y, en algunos casos, se encuentran cubiertas por sustancias cerosas; el tratamiento para elaborar estas preparaciones al microscopio electrónico de barrido revela que algunas de estas ceras se disuelven por los diversos solventes utilizados, pero se conservan todas las estructuras y se observan detalles, como la presencia de algunas proyecciones a manera de picos a distancia periódicas sobre las venas cuya función se conoce. Lo mismo ocurre con los bordes del ala que tienen una estructura corrugada con algunas sedas distribuidas a

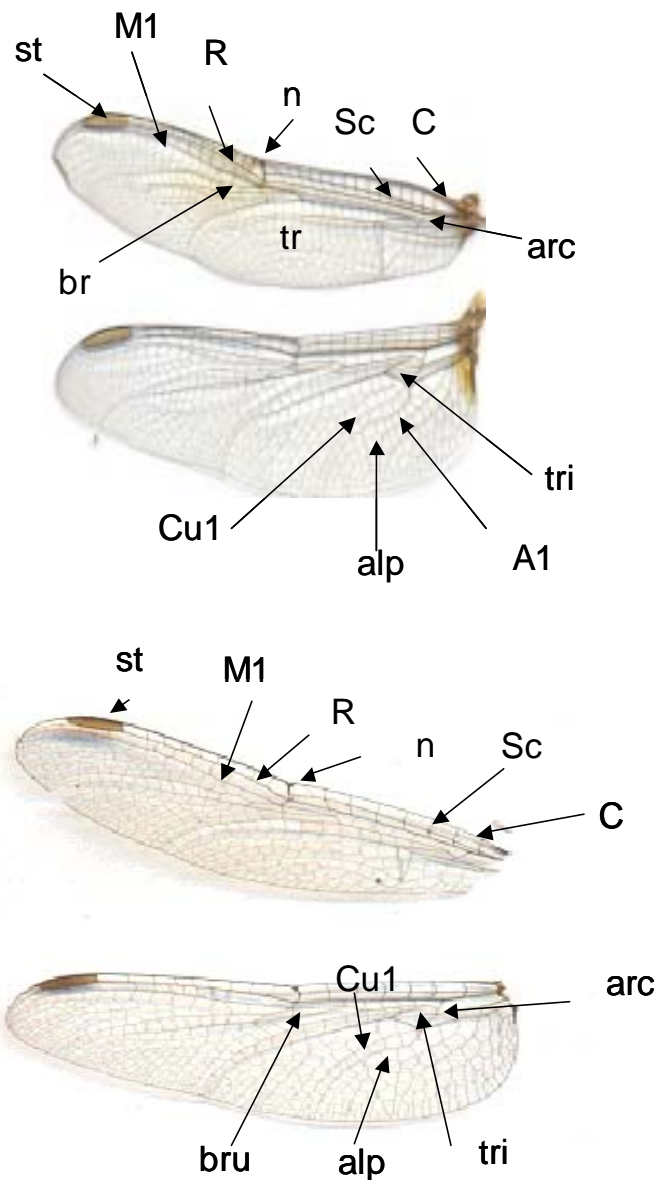


FIGURA 1. Estructura de las alas de dos libélulas de las especies *Erythemis vesiculosa* Fabricius y *Erythrodiplax berenice* Drury, con las principales venas y las manchas apicales anteriores que presentan muchas de ellas (Fotos: Barrera y Villeda, 1994).

distancias periódicas (Figuras 2). En apariencia la formación de esta sustancia cerosa en la superficie de las alas sólo ocurre una vez en la vida de las libélulas, debido a que son sintetizadas por unas células epidérmicas secretoras que después desaparecen en los adultos y ya no se secretan nuevamente, lo cual indica que los patrones de las ralladuras que aparecen en ellas reflejan la historia individual de cada insecto. Por regla general, entre más viejas las libélulas, mayor cantidad de ralladuras presentan (Gorb *et al.*, 2000).

Tal vez una de las funciones de estas sustancias sea la de mantener secas las alas ya que se sabe que las hembras depositan sus huevos en cuerpos de agua o en

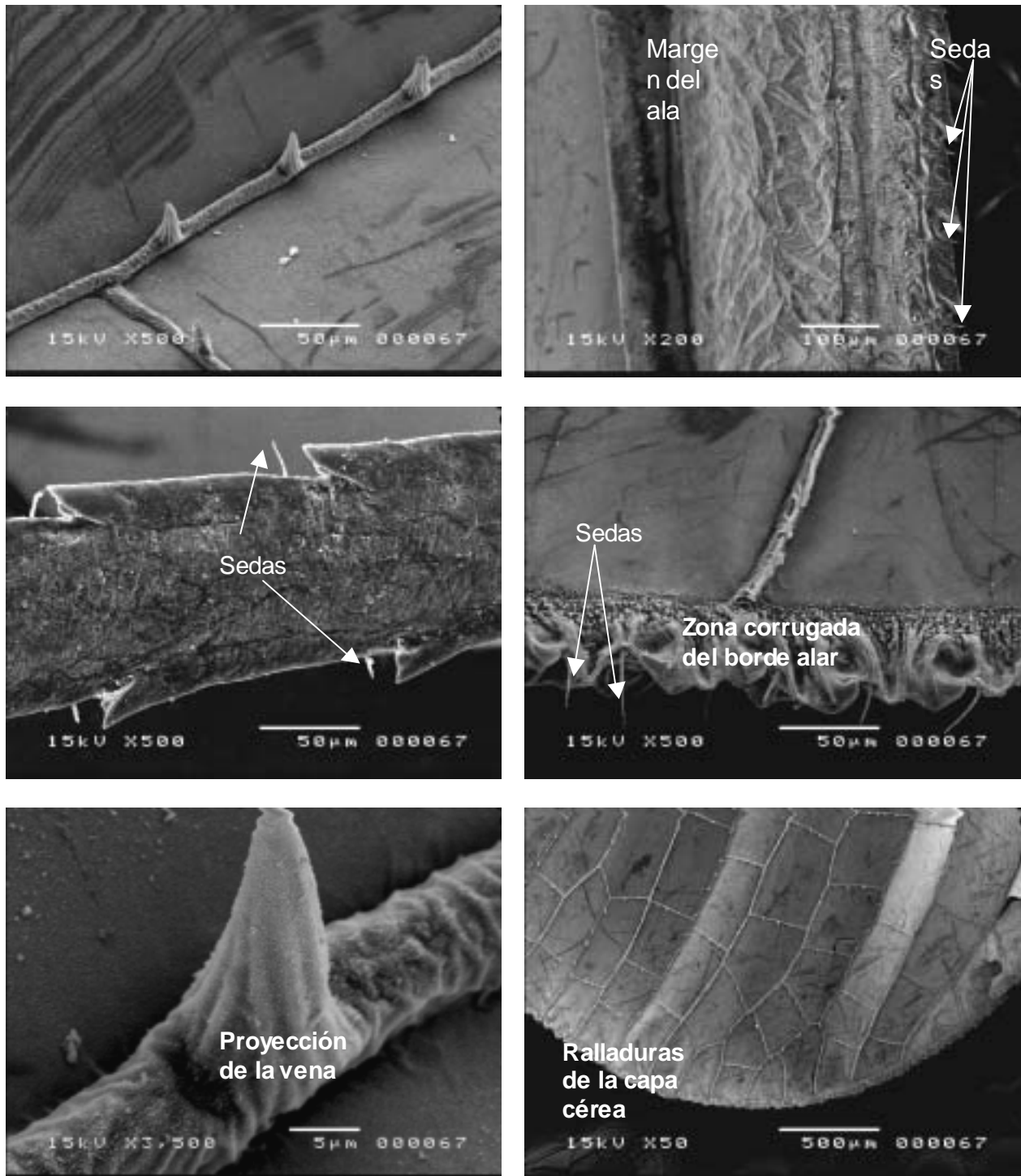


FIGURA 2. Detalles observados en las alas con la técnica de microscopía electrónica de barrido. (Fotografías: Héctor Barrera, 1994).

zonas cercanas, incluso algunas de ellas se sumergen en el agua para poner sus huevos.

Iridiscencia en las alas

La iridiscencia, fenómeno óptico caracterizado por la propiedad que muestran algunas superficies en las cuales se reflejan los colores brillantes del arco iris, de acuerdo

con en ángulo de incidencia de la luz, ocurre también en las alas de las libélulas (3). Esta iridiscencia es causada por los reflejos múltiples de las superficies con varias capas semitransparentes que poseen. Esta propiedad, junto con los patrones de pigmentación en cada especie, les permite un tipo de comunicación para su comportamiento territorial y reproductivo, así que también tienen una función biológica importante además del vuelo (Vukusic *et al.*, 2004).

En muchos casos, las alas se utilizan por sus propiedades iridiscentes como objetos de ornato, adheridas en objetos como figuras de cerámica y de otros materiales. Incluso, se imitan sus propiedades ópticas en algunas piedras de joyería (9).

Las libélulas siempre atraen a gran cantidad de curiosos, deseosos de saber más acerca de su comportamiento y capacidades, además de ser misteriosas y atractivas

Músculos poderosos unidos a las alas

La estructura de los músculos de los insectos, vista al microscopio electrónico, se asemeja a la de los vertebrados, con sus fibras musculares de actina y miosina, estriadas semejantes, pero en lugar de unirse a los huesos penetran la cutícula y se insertan en la epicutícula. En estos músculos se observan dos tipos de nervio: uno, responsable de la contracción rápida, y otro, de la contracción lenta. A veces se presenta un tercer axón, con efecto inhibitorio, con el que se acelera la relajación. En el caso de los músculos oscilantes, las contracciones pueden llegar a ser de 100 a 200 o más veces por segundo (Wigglesworth, 1978; Marden, 2001), y más rápidas que los cambios de potencial eléctrico necesarios para la contracción muscular convencional, por lo que se ha llegado a decir que los impulsos nerviosos sólo sirven para reactivar un tipo de músculos que son fibrilares u oscilantes de vuelo. Para estos organismos, los músculos de vuelo constituyen 24 % del peso total del cuerpo. Las alas de las libélulas poseen músculos muy poderosos y especiales que les permiten viajar grandes distancias sin sufrir fatiga. Estos estudios sobre la musculatura han permitido a los fisiólogos comprender cómo se hacen altamente eficientes.

Los músculos relacionados con el movimiento de las alas contienen seis tipos de moléculas de troponinas T y la abundancia relativa de cada una de ellas afecta la sensibilidad al Ca^{2+} [(Marden *et al.*, 2001) (7)], de las fibras musculares hasta 10 veces, lo cual redundaría en la eficiencia en la contracción y, por ende, en la capacidad de vuelo (Fitzhugh y Marden, 1997; Takekura y Armstrong, 2002).

Mecanismo de vuelo

En las libélulas, el vuelo se realiza por músculos indirectos, dispuestos a manera de columnas verticales y longitudinales, que deforman la caja del tórax al contraerse y así mueven las alas articuladas con ella. Los músculos no están unidos directamente a las alas, sino al "noto", que corresponde a la parte superior de la caja torácica y que a su vez está unida al borde de las alas que se proyectan hacia fuera, por el borde lateral de la caja torácica, llamada fragma (Corbet, 1999). Este punto o pivote no se mueve, pero sí soporta la base del ala, realizando un movimiento de palanca en un punto de apoyo similar (Figura 3). Para

batir el ala que se proyecta hacia fuera, se balancea sobre el pivote, formando un ángulo de movimiento; cuando el conjunto de músculos que conectan con el noto y el esternito (parte baja de la caja torácica) se contraen, el noto es atraído hacia abajo y arrastra consigo la base del ala y, como el pivote no se mueve, el ala se eleva. Cuando estos músculos se relajan, otro conjunto de músculos se contraen y estos son longitudinales, están conectados a los márgenes anterior y posterior del noto, formando una cuerda de "arco". Al contraerse éstos el noto sube y eleva su porción central, lo cual propicia que ahora el ala baje en el segundo movimiento. Además de estos movimientos que suben y bajan, existen otros juegos de músculos que pueden mover las alas lateralmente y también atraer la parte delantera, antes que la trasera, propiciando tracción hacia arriba y hacia delante. Durante el vuelo se producirán tres movimientos: 1) batimiento del ala hacia arriba y hacia abajo, 2) movimiento de flexión o inclinación y 3) balanceo hacia adelante o hacia atrás, como si fuera el remo de una lancha con un punto de apoyo. Estos tres tipos de movimiento ocurren simultáneamente, lo que produce un movimiento de desplazamiento. En cada tipo de insecto es similar, pero en diferente grado según la velocidad y el largo del ala.

Podría pensarse que a mayor tamaño de las alas en los insectos, estos son más potentes en su vuelo; sin embargo, si se compara a las libélulas con las mariposas y escarabajos, entre otros insectos, cuyas alas son más grandes, nos damos cuenta que no alcanzan la misma velocidad de vuelo. El aire, a diferencia del agua, tiene menor densidad y ofrece poco soporte de flotación; por ello, todos los voladores deben vencer a la gravedad, utilizando principios de sustentación aerodinámica. Así, gracias a las menores fuerzas de resistencia aerodinámica desarrolladas, pueden conseguir velocidades mucho mayores (5). La producción de fuerza propulsora para dirigir a un organismo hacia delante y de sustentación para mantenerse en el aire, se consiguen simultáneamente con el batido de las alas (6).

La libélula como un modelo para la fabricación de los helicópteros

Si se revisa cómo vuela una libélula, difícilmente se podrá encontrar una nave que pueda superar ese vuelo (11); el helicóptero está muy lejos de este insecto, pero más cerca en el tiempo si se toma en cuenta que aun en su larga vida el hombre no ha cumplido ni siquiera un siglo en sus intentos de vuelo y ya llegó a Marte. Sin embargo, hace sus mejores intentos, como la compañía Sicsorsky, que está dedicada a la fabricación de helicópteros y tomó a estos insectos como modelo (Figura 4) para fabricar un prototipo de transporte militar de artillería o de rescate y, junto con la compañía IBM, introdujo un modelo de computadora para imitar las maniobras de vuelo de la libélula, además de imitar su forma corporal.

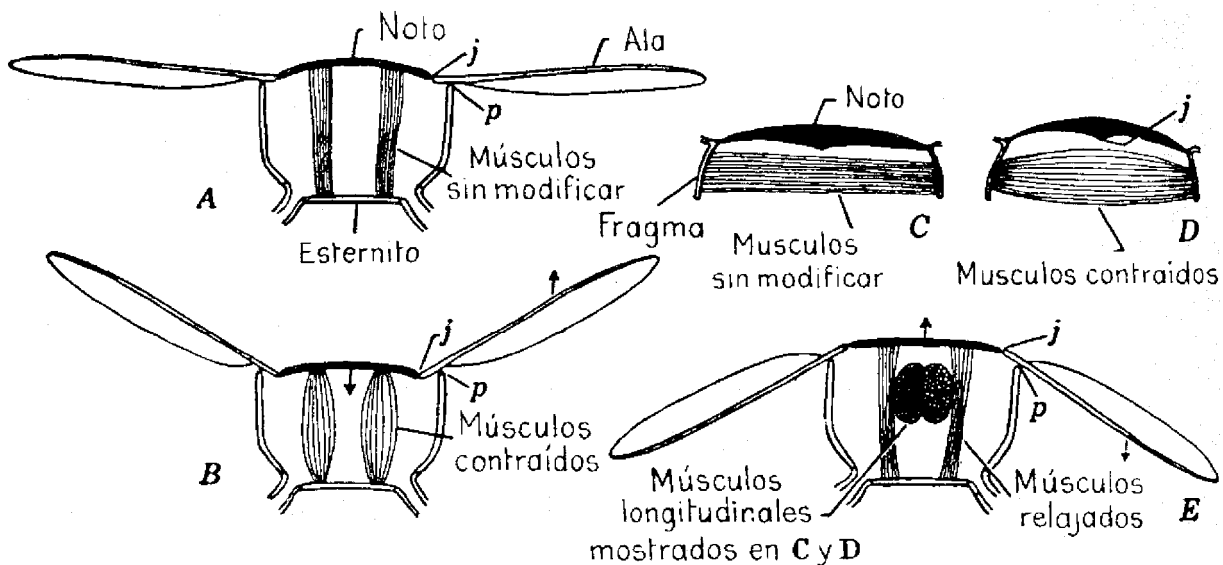


FIGURA 3. Mecanismo de vuelo en las libélulas por medio de la contracción de los músculos de la caja torácica. La parte superior se denomina notto, la parte inferior se denomina esternito y las paredes laterales se llaman fragma (ver texto, modificado de Ross, 1973).

Helicópteros diminutos

Por otro lado, un fabricante japonés de impresoras de la marca S. Epson, presentó recientemente un helicóptero diminuto teledirigido, considerado como el más ligero y pequeño del mundo. Se piensa que pudiera servir para tomar fotografías desde el aire, por ejemplo, en catástrofes y otras situaciones (2), en donde no se tiene fácil acceso. Este aparato pesa solamente 10 g y mide 70 mm, es un robot teledirigido, pero por ahora tiene que recibir recargas de combustible con un cable de 1.5 m, unido a un generador eléctrico. A este prototipo lo llamaron "Micro Flying robot" (Figura 5), muy similar en su diseño al de una libélula (1, 4); éste cuenta con una cámara incorporada para moverse sobre lugares de difícil acceso, como casas destruidas por terremotos y otros desastres naturales, localizar sobrevivientes, etc. En un futuro se espera dotar

a este robot con una pila de larga duración y el diseñador se encuentra en colaboración con otras industrias interesadas para que fabriquen pilas de muy bajo peso y tamaño para usarse en este prototipo. Este modelo se presentó en una exposición de Tokio, todavía sin fines de comercialización.

Libélulas Robot

Recientemente, se han desarrollado nuevos materiales que sirven como inductores de movimiento para motores convencionales de tipo electromecánico; son los "elastómeros dieléctricos" y los "polímeros conductivos", que sirven para que se les puedan aplicar fuerzas que sean aprovechadas de mejor manera y que permiten simular más fácilmente los movimientos de las alas de las libélulas. Estos materiales se pueden deformar muchísimo y regresar a su

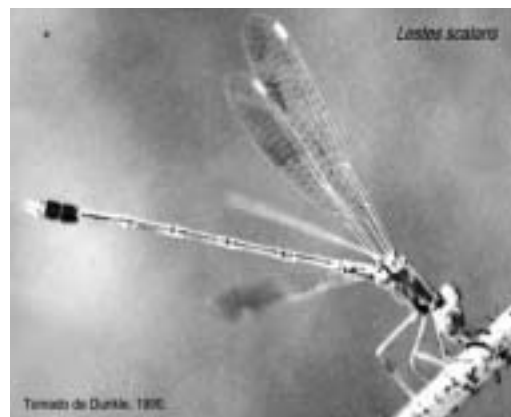


FIGURA 4. Modelo R-5 H-5 Sicsorsky, llamado "dragonfly" (foto izquierda), cuyas características son similares a las de una libélula (foto derecha).



FIGURA 5. Modelo diminuto de un helicóptero muy pequeño de no más de 70 cm. diseñado por Epson (4).

estado original cuando se les aplican fuerzas o corrientes eléctricas por medio de un motor. Estos movimientos proporcionarán ciclos de expansión y contracción en frecuencias superiores a 100 Hz, lo que permitirá fabricar "músculos artificiales" con movimientos que nunca podrán ser imitados por los motores tradicionales (10).

Estos nuevos principios se han aplicado a libélulas artificiales, por diferentes grupos de investigación, para construir robots del mismo tamaño que estos insectos y que son capaces de volar batiendo sus alas.

Los elastómeros dieléctricos son materiales capaces de modificarse por medio de electrodos, cambiando varias veces su tamaño y pueden regresar a su forma original cuando se les interrumpe la corriente, y así, preñdiendo y apagando la corriente, se logran ciclos de expansión y contracción de altas frecuencias para propiciar el movimiento adecuado que se podría aplicar a las alas (Figura 6).

En la articulación del ala de las libélulas se ha descubierto una proteína especial que tiene una flexibilidad muy grande, llamada "resilina"; los ingenieros químicos tratan de reproducirla en los laboratorios, pues muestra propiedades superiores a las de caucho natural o artificial. Esta molécula es una sustancia capaz de absorber casi toda la fuerza ejercida sobre ella y también puede liberar toda la energía aplicada cuando cesa la carga sobre ella. La eficiencia es superior a 96 %, mayor que la de los elastómeros mencionados, así 85 % de la energía que genera el insecto se emplea para levantar las alas y sólo 11 % para bajarlas

Componentes fotocromáticos

Por otro lado también se han desarrollado otros materiales que forman componentes que pueden ser "fotoactivados", los cuales sufren cambios de conformación

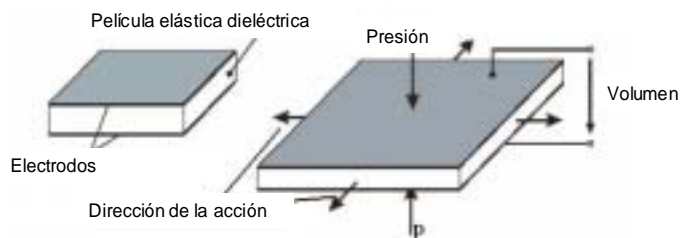


FIGURA 6. Materiales especiales con capacidades de modificación capaces de alterarse y regresar a su estado original que pudieran servir como elastómeros dieléctricos (Modificado de 10).

reversibles. Si se les proporciona energía luminosa de cierta longitud de onda pueden cambiar de forma, para que resulten en movimientos cíclicos muy rápidos y por mayores periodos. A estos compuestos se les llama también fotocromáticos, como el caso de 1,2-bis (3 tienil) ciclopentano, desarrollado por Branda (10). Estos compuestos bien podrían servir para su aplicación como polímeros conductivos, en la nanomanipulación, y como apagadores ópticos, con la finalidad de evitar la recarga de combustibles en estos prototipos mecánicos.

Polímeros conductores

Los polímeros conductores son otra clase de materiales que empiezan a utilizarse en la nueva tecnología, se conocen como plásticos electrónicos. Entre éstos están los compuestos llamados polipirroles, que se han investigado con difracción de rayos X y por difracción electrónica, y se observa que en sus diferentes estados de oxidación, los cambios de estructura microscópica que sufren permiten que puedan utilizarse como activadores electroquímicos o músculos artificiales (10).

LITERATURA CITADA

- CORBET S., P. 1999 Dragonflies behavior and ecology of Odonata. Comstock Pub. Associates. New York. pp. 383-424.
- FITZHUGH, G. H.; MARDEN, J. H. 1997. Maturational changes in troponin T expression, calcium sensitivity, and twitch contraction kinetics in dragonfly flight muscle. *Journal of Experimental Biology* 200: 1473-1482.
- GONZÁLEZ, S. E. 1977. Contribución al estudio de la subfamilia Libellulinae (Odonata: Libellulidae) del estado de Veracruz. UNAM. México, D.F. 164 pp.
- GORB S. N.; KESEL, A.; BERGER, J. 2000. Microsculpture of the wing surface in Odonata: evidence for cuticular wax covering. *Arthropod Structure and Development* 29, 129-135.
- HENNING, H. 1981. Insect phylogeny. John Wiley. New York. 514 pp.
- MARDEN J., H.; FITZHUGH, G. H.; GIRGENRATH, M. 2001 Alternative splicing, muscle contraction and intraspecific variation: Associations between troponin T transcripts, Ca(2+) sensitivity and the force and power output of dragonfly flight muscles during oscillatory contraction. *J. Exp. Biol.* 204 (20): 3457-3470 .

- MARTYNOV, A. V. 1924. Uber Zwei Grundtypen der flugel bei den Insekten und ihre evolution. Z. Morphol. Ockol. 4: 465-501
- MILLER, P. L. 1987. Dragonflies. Naturalist Handbooks 7. Cambridge University Press. pp. 1-44.
- NEEDHAM, G. J.; Westfall, J. M. 1975. A Manual of the dragonflies of North America (Anisoptera). University of California Press. Los Angeles. 609 pp.
- ROSS, H. H. 1973 Introducción a la entomología general y aplicada. Omega. Barcelona. pp. 168-173
- TAKEKURA, H.; FRANZINI-ARMSTRONG, C. 2002. The structure of Ca²⁺ release units in arthropod body muscle indicates an indirect mechanism for excitation-contraction coupling. Biophys. J. 83(5): 2742-2753.
- VUKUSIC, P.; WOOTTON, R. J.; SAMBLES, J. R. 2004. Remarkable iridescence in the hindwings of damselfly *Neurobasis chinensis chinensis* (Zygoptera: Calopterygidae). Proc. R. Soc. Lond. B. 271: 595-601.
- WIGGLESWORTH, V. B. 1978. Fisiología de los insectos. Acribia. España. 121-151.

Referencias electrónicas

- 1.- <http://groups.msn.com/ODONATA/morfologaalarenodonatos.msnw>
31/05/2005
- 2.- <http://iblnews.com/news/print.php3?id=92691> 13/04/2005
- 3.- <http://www.biologydaily.com/biology/iridescence> 26/05/2005
- 4.- <http://www.noticiasdot.com/publicaciones/2003/1103/2011/noticias>
201103/noticias 20110
30/05/2005
- 5.- http://tolweb.org/accesory/flight?.acc_id=2471 26/04/2005
- 6.- <http://www.el-mundo.es/larevista/num158/textos/libe.html> 26/04/2005
- 7.- <http://www.trinity.edu/mstroud/science/17en97.html> 26/04/2005
- 8.- <http://jeb.biologists.org/cgi/content/abstract/204/203457> 29/04/2005
- 9.- <http://www.aikarin.com/mlp/customs/dracolaria.html> 26/05/2005
- 10.- <http://mm.ece.ubc.ca/research.htm> 26/04/2005
- 11.- info@harunyahya.com 26/05/2005