

# INVESTIGACION *y* CIENCIA

AGOSTO 2001  
800 PTA. 4,81 EURO

Edición española de  
**SCIENTIFIC  
AMERICAN**

## LA PARADOJA DE LA CORONA SOLAR

LA HISTORIA DE LA CIENCIA  
DURANTE LOS ULTIMOS  
25 AÑOS

CRECIMIENTO  
Y CAIDA DEL PELO

RUMBO A MARTE

EL VUELO DE LOS INSECTOS



## SECCIONES

3

**HACE...**

50, 100 y 150 años.

32

**PERFILES**

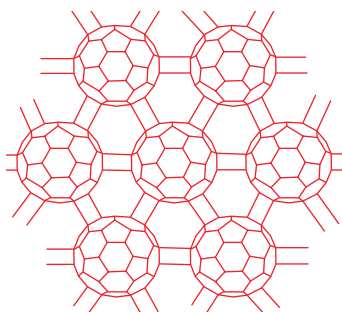
Paul W. Ewald:  
Un huésped de ideas  
infecciosas.



34

**CIENCIA Y SOCIEDAD**

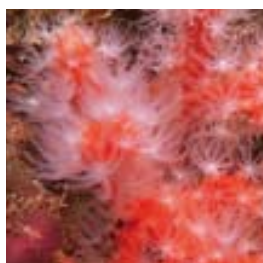
Enfermedad de Darier...  
Fullerenos... Azul de ave...  
Aves gigantes voladoras...  
Explorador Ultravioleta  
Internacional...  
Amazonía peruana.



42

**DE CERCA**

El coral rojo.



4



### El vuelo de los insectos

*Michael Dickinson*

Los insectos, los primeros animales que desarrollaron el vuelo activo, se mantienen en el aire merced a una combinación de efectos aerodinámicos.

### La paradoja de la corona solar

*Bhola N. Dwivedi y Kenneth J. H. Phillips*

La superficie del Sol es una región bastante templada, pero las capas solares exteriores están hirviendo. Los astrónomos han comenzado a entender la razón de esa paradoja aparente.



14

22

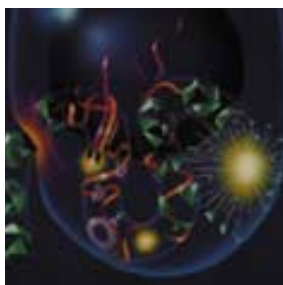


### El lenguaje de los signos en el cerebro

*Gregory Hickok, Ursula Bellugi y Edward S. Klima*

¿De qué modo se procesa el lenguaje en el cerebro humano? Nuevos estudios con sordomudos ofrecen las bases de una respuesta.

44



## Mecanismo de acción de los interferones

Jesús Gil y Mariano Esteban

Consideradas un artefacto en un comienzo, estas citoquinas descubiertas en 1957 se aplican al tratamiento de múltiples enfermedades. ¿Cuál es su mecanismo de acción?

52

## Ensayo para Marte

Robert Zubrin

Para preparar el camino a las futuras misiones a Marte, un grupo de científicos simuló, en el árido Artico canadiense, tareas a realizar en el planeta.



56



## Crecimiento y caída del pelo

Ricki L. Rusting

La clave del combate contra la calvicie puede estar en las moléculas que controlan el crecimiento capilar.

64

## Los himba y la presa hidroeléctrica

Carol Ezzell

La zona donde se levantará la presa sobre el río Kunene es un microcosmos que ilustra la suerte que pueden correr otras regiones del mundo en las que hay decenas de embalses en construcción.



74



## La historia de la ciencia durante los últimos 25 años

José M.ª López Piñero

El proceso de desmantelamiento de las instituciones científicas públicas condiciona cualquier balance que se intente de la trayectoria, durante los últimos veinticinco años, de la investigación histórica de la ciencia.

## SECCIONES

82

### TALLER Y LABORATORIO

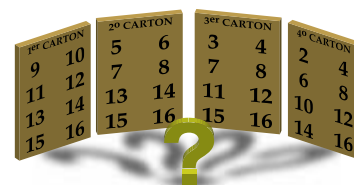
El empuje de Arquímedes, por Roland Lehouck y Jean-Michel Courty



84

### JUEGOS MATEMÁTICOS

¿Cuál es la mejor estrategia en un juego de preguntas sí/no?, por Juan M.R. Parrondo



87

### AVENTURAS MATEMÁTICAS

Mentirosos alternantes, por Dennis E. Shasha

88

### IDEAS APLICADAS

Protectores solares, por Mark Fischetti

90

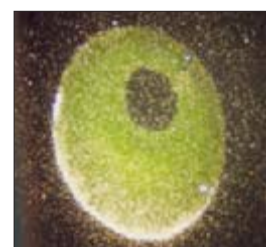
### NEXOS

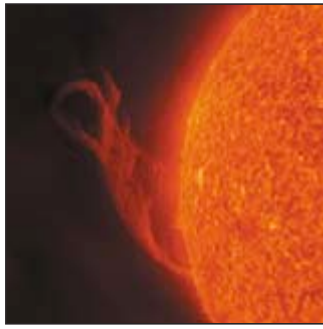
De arriba abajo, por James Burke

92

### LIBROS

Biología del desarrollo... Caulerpa.





**Portada:** Centro de Vuelos Espaciales Goddard/NASA

## PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Página	Fuente
4-7	Timothy Archibald
8-9	Bryan Christie
10-11	Timothy Archibald
14-15	Centro de Vuelos Espaciales Goddard, NASA
16	TRACE/NASA
17	Instituto de Ciencias del Espacio y Astronáutica, Japón; Laboratorio Solar y de Astrofísica Lockheed-Martin; Observatorio Nacional Astronómico de Japón; Universidad de Tokio; NASA
18	Don Dixon
20	Laurie Grace
21	Jean Mouette y Serge Koutchmy, ©Instituto de Astrofísica de París
22-29	Peter Stemler
44-50	Jesús Gil y Mariano Esteban
52-53	Andy Peterson
54	Robert Zubrin
55	Andy Peterson
57	Jeff Mermelstein
58-59	Joe Zeff
60	Jeff Mermelstein
61	Joe Zeff; fuente: O'Tar T. Norwood
62	Jeff Mermelstein
64-67	Karin Retief
68	Susan Carlson ( <i>mapa</i> ); Karin Retief ( <i>fotografías</i> )
70-73	Karin Retief
77	Instituto Nacional de Técnicas Aeronáuticas ( <i>arriba</i> ); Instituto de Ciencia de Materiales de Aragón ( <i>abajo</i> )
78	Cortesía de Carlos Ferrater Lambarri. Jardín Botánico de Barcelona
79	M. Alcaraz, Instituto de Ciencias del Mar de Barcelona
80	Universidad Politécnica de Valencia ( <i>arriba</i> ); Instituto de Biología Molecular de Barcelona ( <i>abajo</i> )
81	Observatorio Astronómico de Mallorca ( <i>arriba</i> ); Observatorio del Roque de los Muchachos en La Palma ( <i>abajo</i> )
82-83	Bruno Vacaro
84-86	Juan M.R. Parrondo
87	John McFaul
88-89	George Retseck

## COLABORADORES DE ESTE NUMERO

### Asesoramiento y traducción:

J. Vilardell: *El vuelo de los insectos, Hace..., Taller y laboratorio e Ideas aplicadas*; M.ª Rosa Zapatero: *La paradoja de la corona solar*; Luis Bou: *El lenguaje de los signos en el cerebro y Aventuras matemáticas*; Juan Pedro Campos: *Ensayo para Marte y Fullerenos (Ciencia y sociedad)*; José Manuel García de la Mora: *Los himba y la presa hidroeléctrica*; Angel Garcimartín: *Perfiles*; José M.ª Valderas Martínez: *Nexos*

## INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL Francisco Gracia Guillén

EDICIONES José María Valderas, *director*

ADMINISTRACIÓN Pilar Bronchal, *directora*

PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón

Bernat Peso Infante

SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez

EDITA Prensa Científica, S. A. Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona (España)

Teléfono 93 414 33 44 Telefax 93 414 54 13

## SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF John Rennie

MANAGING EDITOR Michelle Press

ASSISTANT MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting

NEWS EDITOR Philip M. Yam

SPECIAL PROJECTS EDITOR Gary Stix

SENIOR WRITER W. Wayt Gibbs

EDITORIAL DIRECTOR, ON-LINE Kristin Leutwyler

EDITORS Mark Alpert, Steven Ashley, Graham P. Collins, Carol Ezzell,

Steve Mirsky, George Musser y Sarah Simpson

PRODUCTION EDITOR Richard Hunt

VICE PRESIDENT AND MANAGING DIRECTOR, INTERNATIONAL Charles McCullagh

PRESIDENT AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER Gretchen G. Teichgraber

CHAIRMAN Rolf Grisebach

## SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.  
Muntaner, 339 pral. 1.ª  
08021 Barcelona (España)  
Teléfono 93 414 33 44  
Fax 93 414 54 13

### Precios de suscripción:

	Un año	Dos años
España	8.800 pta. 52,89 euro	16.000 pta. 96,16 euro
Extranjero	11.500 pta. 69,12 euro	21.500 pta. 129,22 euro

### Ejemplares sueltos:

Ordinario: 800 pta. 4,81 euro  
Extraordinario: 1.000 pta. 6,01 euro

—El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

## DISTRIBUCION

### para España:

**LOGISTA, S. A.**  
Aragoneses, 18 (Pol. Ind. Alcobendas)  
28108 Alcobendas (Madrid)  
Tel. 91 484 39 00

### para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.  
Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona  
Teléfono 93 414 33 44

## PUBLICIDAD

GM Publicidad  
Francisca Martínez Soriano  
Menorca, 8, semisótano, centro, izquierda.  
28009 Madrid  
Tel. 91 409 70 45 – Fax 91 409 70 46

### Cataluña y Baleares:

Miguel Munill  
Muntaner, 339 pral. 1.ª  
08021 Barcelona  
Tel. 93 321 21 14  
Fax 93 414 54 13

Difusión controlada



Copyright © 2001 Scientific American Inc., 415 Madison Av., New York N. Y. 10017.

Copyright © 2001 Prensa Científica S.A. Muntaner, 339 pral. 1.ª 08021 Barcelona (España)

Reservados todos los derechos. Prohibida la reproducción en todo o en parte por ningún medio mecánico, fotográfico o electrónico, así como cualquier clase de copia, reproducción, registro o transmisión para uso público o privado, sin la previa autorización escrita del editor de la revista. El nombre y la marca comercial SCIENTIFIC AMERICAN, así como el logotipo correspondiente, son propiedad exclusiva de Scientific American, Inc., con cuya licencia se utilizan aquí.

ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 – 76

Filmación y fotocromos reproducidos por Dos Digital, Zamora, 46-48, 6ª planta, 3ª puerta - 08005 Barcelona  
Imprime Rotocayfo-Quebecor, S.A. Ctra. de Caldes, km 3 - 08130 Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

# HACE...

## ...cincuenta años

**EL TRANSISTOR.** «Desde estas etapas iniciales del desarrollo de los transistores parece ya seguro que sustituirán a las válvulas de vacío en casi cualquier aplicación. ¿Qué resultados cabe esperar de esta gran revolución en las técnicas y posibilidades de la electrónica? Puesto que la revolución no ha hecho más que empezar, sólo podemos especular. Una parte sustantiva de las mejoras en las características funcionales del aparato se debe a la aparición de un nuevo dispositivo llamado 'transistor de uniones'. Las unidades primitivas consistían en un cristal de germanio en contacto con dos conductores muy finos, los 'bigotes de gato'. En el transistor de uniones esos contactos puntuales han sido sustituidos por contactos de más superficie. Por tanto funciona con mayor rendimiento y consume mucha menos potencia. —Louis N. Ridenour.»

**OJO Y CEREBRO.** «Adelbert Ames ha ideado algunos procedimientos nuevos para estudiar la percepción visual. Su teoría sugiere que el mundo que cada uno de nosotros conoce es un mundo creado en gran medida por nuestra experiencia con

el entorno. En la ilustración, las figuras aparecen desvirtuadas cuando se colocan en una sala especial. La mujer de la izquierda parece mucho menor porque la mente 'apuesta' a que las superficies opuestas de la sala son paralelas.»

**LA EXPANSIÓN DEL UNIVERSO.** «El telescopio Hale de 508 cm de Monte Palomar, en California, ha dado una respuesta provisional a una de las muchas preguntas para las que fue construido: ¿Sigue el universo expandiéndose a velocidad creciente más allá de los límites de visibilidad de los telescopios anteriores? La respuesta parece ser positiva. A una distancia de 360 millones de años luz, límite hasta ahora de la penetración de los 508 cm, las nebulosas aparentemente se alejan de la Tierra a una velocidad de más de 60.000 kilómetros por segundo, cifra predicha por la teoría de la expansión del universo.»

## ...cien años

**QUEMADURAS POR RADIACIÓN.** «Merced a una desagradable experiencia, Henri Becquerel ha confirmado el hecho, ya apuntado por Walkoff y Giesel, de que los rayos del radio ejercen una acción

energética sobre la piel. Tras portar durante unas seis horas, en el bolsillo de su chaleco, un pequeño tubo sellado con unos pocos decigramos de cloruro de bario, sustancia intensamente radiactiva, se le apreció, diez días más tarde, en la piel una marca roja correspondiente al tubo; la piel se desprendió dejando una llaga supurante, que tardó un mes en sanar. Pierre Curie sufrió la misma experiencia tras exponer un brazo durante más tiempo a una muestra menos activa.»

**LA ANTÁRTIDA.** «El año presente será memorable en los anales de la Exploración Antártica, puesto que concertadamente se llevarán a cabo esfuerzos decididos por la Sociedad Geográfica Británica y el gobierno alemán encaminados a desentrañar algo de la *terra incognita*. La embarcación en la que se hará a la mar la expedición británica, *HMS Discovery*, fue recientemente botada en Dundee (Escocia). El jefe de la expedición, que durará tres años, es el capitán R. F. Scott, de la Real Reserva Naval.» [Nota de la redacción: Se trata de la primera expedición a la Antártida de Robert Falcon Scott.]

## ...ciento cincuenta años

**PIEDRAS EN LA MENTE.** «Míster George Gibbs, de Newport (Rhode Island), fundador de la magnífica vitrina de minerales del Colegio Yale, estaba en cierta ocasión buscando minerales en el norte de Vermont con la ayuda de tres o cuatro obreros. Un día llegó en carruaje a la taberna donde se hospedaba un amigo suyo, se dieron la mano y se saludaron amablemente. Al observar tal cosa, el patrono se llevó aparte al forastero e informó a éste de que su amigo estaba demente: había empleado hombres durante casi un mes moliendo piedras en pequeños trozos, por lo que si guardaba alguna amistad con aquel caballero, desde luego debería informar a su familia acerca de su estado.»



*Percepción errónea a causa de una perspectiva desvirtuada, 1951*



**1. UN PROTOTIPO DE INSECTO ROBOTICO VOLADOR** se está desarrollando en el Centro de Mecatrónica Inteligente de la Escuela de Ingeniería de Vanderbilt. Estos ingenios se basan en una aerodinámica más afín a la de los insectos que a la de los aviones.

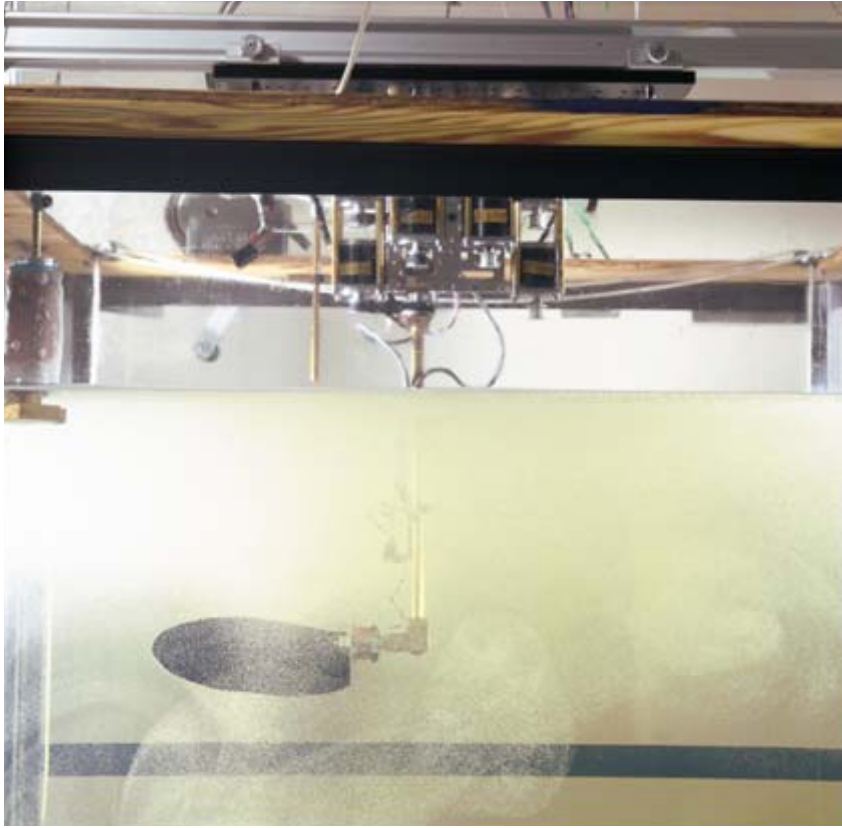
# El vuelo de los insectos

Los insectos, los primeros animales que desarrollaron el vuelo activo, se mantienen en el aire merced a una combinación de efectos aerodinámicos

Michael Dickinson

**E**n un tanque de dos toneladas de aceite mineral, un par de alas mecánicas baten sin cesar, empleando unos pausados cinco segundos en ejecutar cada ciclo. Accionadas por seis motores controlados por ordenador, las alas crean en el fluido un movimiento de remolino. Con los millones de burbujas formadas, el tanque parece una gigantesca jarra de cerveza en cuyo seno se agita una mosca mecánica de 60 centímetros de envergadura alar. La escena está iluminada por láminas destellantes de luz láser verde, mientras videocámaras especiales graban las trayectorias de las brillantes y revueltas burbujas. En las alas, unos sensores registran las fuerzas que sobre ellas ejerce el fluido en cada instante.

Nuestro grupo de investigación construyó tan extraña instrumentación en un empeño por explicar la física de uno de los sucesos más corrientes: el vuelo estacionario de una mosca de la fruta. El insecto nada sabe acerca de la aerodinámica de la generación de vórtices, retardo en la pérdida de sustentación, circulación rotacional y captura de estela; se limita a emplear las consecuencias prácticas de todo ello 200 veces por segundo batiendo sus alas. Nuestro simulacro mecánico del insecto, apodado Robomosca, imita el aleteo del invertebrado, pero a una velocidad mil veces menor y a una escala cien veces mayor. Amedrentados por la rapidez y la pequeñez del sujeto real, depositamos nuestras esperanzas en Robomosca para entender la intrincada aerodinámica que permite a los insectos hacer eso que hacen rutinariamente: volar.



**2. ROBOMOSCA ALETEANDO LENTAMENTE en aceite mineral viscoso. Simula la aerodinámica del aleteo rápido en el aire de una mosca de la fruta. Haces de láser iluminan las burbujas de aire que se forman en el seno del aceite, con el fin de revelar los intrincados flujos que se producen, mientras que sensores instalados en las alas registran las fuerzas que se generan.**

Si atendemos al número absoluto de especies, impacto ecológico o biomasa total, reconocemos que los insectos son los animales predominantes en nuestro planeta. Aunque son múltiples los factores que contribuyen a su éxito extraordinario, en la lista ocupa la capacidad de vuelo uno de los primeros lugares. El vuelo les permite alejarse de su sitio de nacimiento, trasladarse a puntos remotos en busca de alimento y emigrar a climas más cálidos con el cambio de

estaciones. Pero el vuelo no es para ellos una mera forma de traslado. Muchos recurren a la acrobacia aérea para depredar, defender el territorio o encontrar socio sexual. La selección operada en pro de comportamientos de vuelo cada vez más elaborados y eficientes ha llevado al límite la constitución de tales organismos. Entre los insectos hallamos los olfatos más sensibles, los sistemas visuales más agudos y los músculos más potentes, especializaciones todas ellas ligadas de un modo u otro al comportamiento en vuelo.

Por segundo, el vuelo consume 10 veces más energía que la locomoción en tierra. Siguiendo con la inversión energética, el vuelo es, por kilómetro recorrido, cuatro veces más económico que la locomoción en tierra. Cuesta mucho llegar a volar, pero el vuelo es muy valioso para los organismos que gozan de tal capacidad.

Hasta hace poco una molesta laguna se interponía en nuestros conocimientos acerca del vuelo de los insectos: carecíamos de una explicación aerodinámica satisfacto-

ria. Dificultad que se convirtió incluso en leyenda, divulgada como el caso del “científico que demostró que los abejorros no pueden volar”. La historia del abejorro se remonta al libro escrito en 1934 por el entomólogo Antoine Magnan, quien se remite a los cálculos de su ayudante, el ingeniero André Sainte-Laguë. La conclusión se fundaba en el hecho de que la sustentación máxima posible producida por alas de un avión del tamaño de las alas de un abejorro y volando a la velocidad de una abeja sería mucho menor que el peso de una abeja.

En los decenios subsiguientes, ingenieros y matemáticos fueron acumulando un cuerpo de conocimientos aerodinámicos suficientes para proyectar y construir aviones comerciales Boeing 747 y cazas furtivos. Pero por refinados que tales aviones sean, su diseño y funcionamiento se basan en principios estacionarios: el flujo del aire alrededor de las alas y las fuerzas generadas por ese flujo son estables, no varían, a lo largo del tiempo. La dificultad en el caso de los insectos radica en que baten y rotan las alas de 20 a 600 veces por segundo. El consiguiente patrón de flujo de aire crea fuerzas aerodinámicas que varían continuamente y que confunden los análisis, matemáticos y experimentales.

Además de resolver un viejo rompecabezas científico, el saber por qué pueden volar los insectos podría tener aplicaciones prácticas. Los ingenieros han comenzado a explorar la posibilidad de desarrollar robots voladores del tamaño de un pulgar para aplicaciones de búsqueda y salvamento, control ambiental, vigilancia, detección de minas y exploración planetaria.

Aunque el hombre ha conseguido construir modelos de avión del tamaño de un gorrión, nadie ha construido un avión del tamaño de una mosca capaz de volar. En escalas tan exiguas, la viscosidad del aire cobra mayor importancia y atenúa el flujo de aire que mantiene en vuelo a los aviones grandes. Los insectos baten las alas no sólo porque nunca desarrollaron ruedas, engranajes y turbinas, sino porque sus dimensiones liliputienses re-

## El autor

MICHAEL DICKINSON, profesor del departamento de biología en la Universidad de California en Berkeley, dio sus primeros pasos en el campo de la neurología estudiando las bases celulares de la conducta. Su interés por el vuelo se le despertó al socaire de un trabajo sobre las diminutas estructuras sensoriales que perciben la flexión de un ala batiente. Ahora aborda el comportamiento de un modo integral, en el que convergen el análisis biológico, los principios de la física y las posibilidades de la ingeniería.



quieren el uso de unos mecanismos aerodinámicos diferentes. Los insectos robóticos del futuro podrían deber su agilidad aerodinámica a sus análogos naturales.

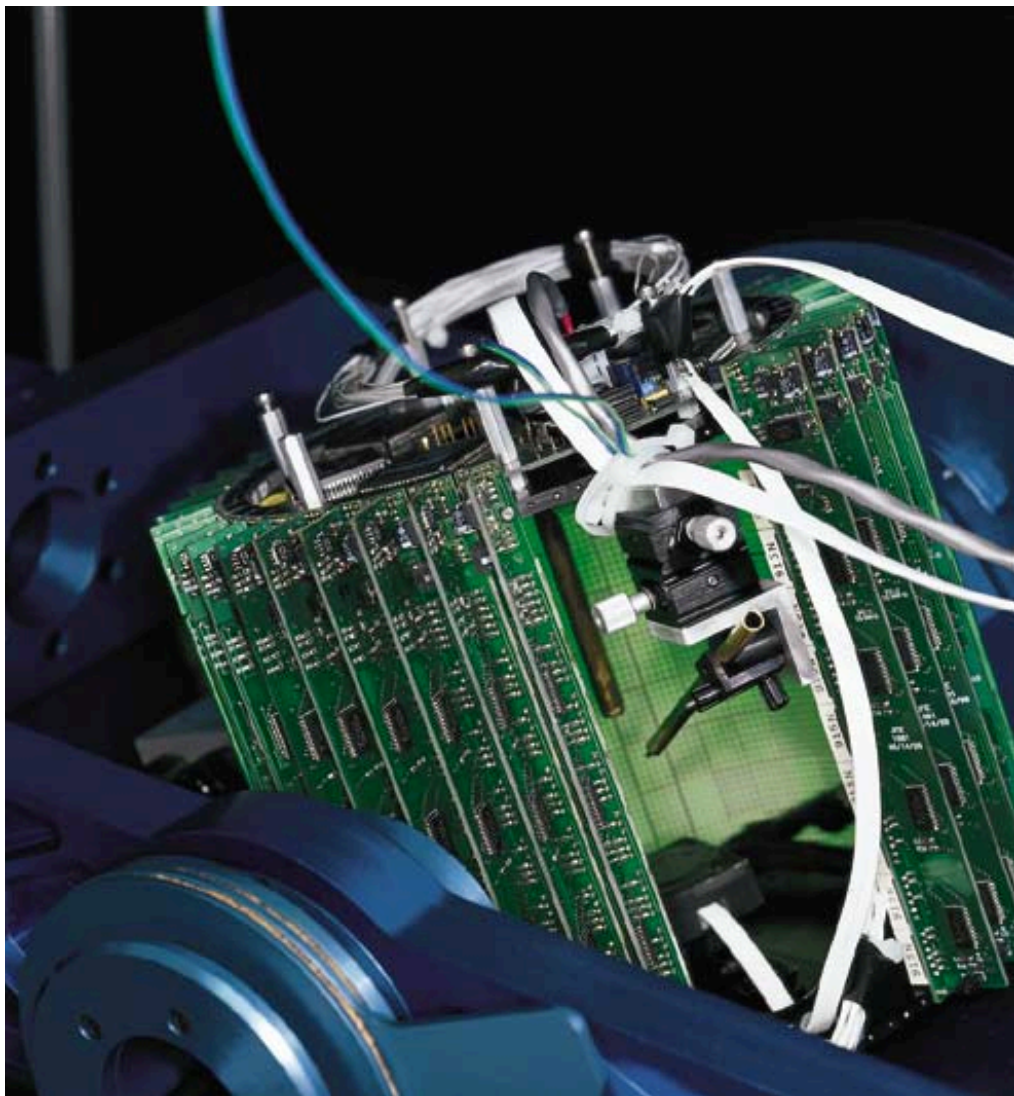
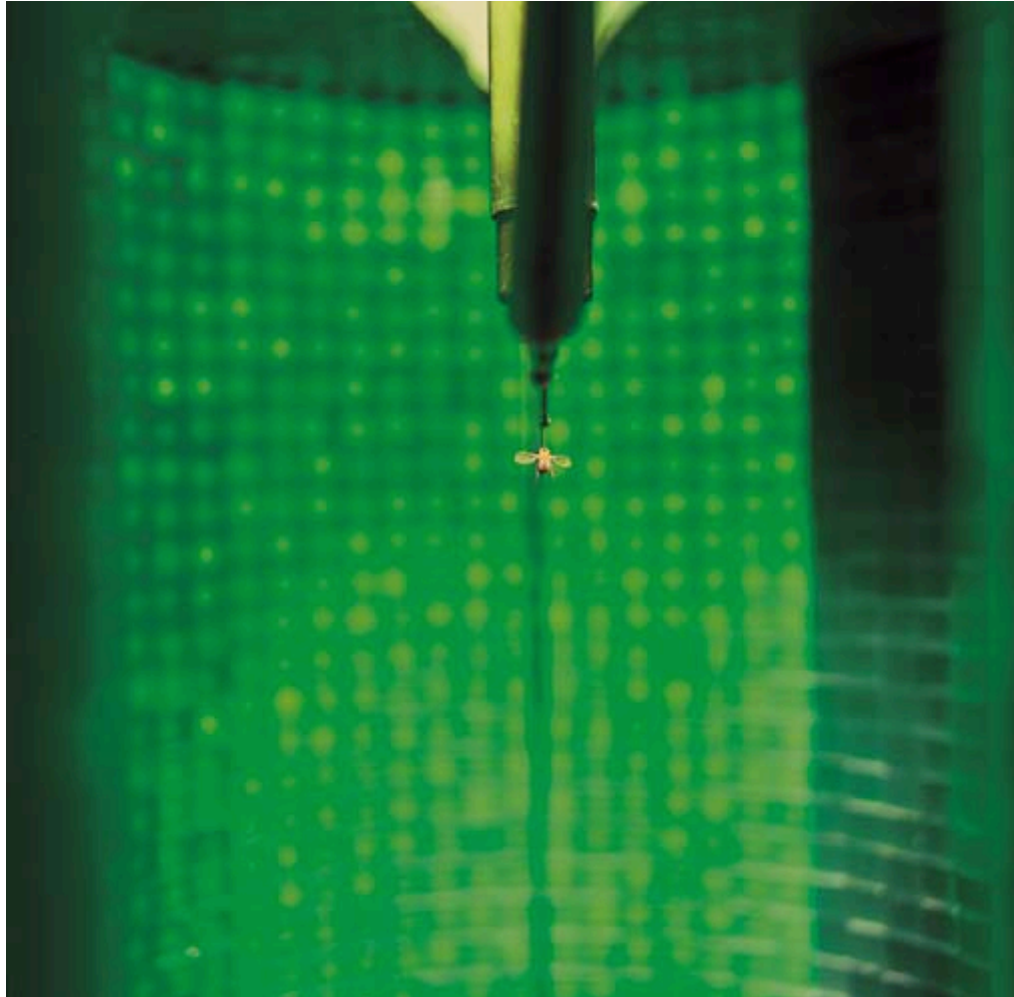
### Revuelo de alas

Para un observador ocasional es evidente que un insecto no vuela igual que un avión. Mucho menos obvia resulta la complejidad del aleteo. Las alas de los insectos no se limitan a oscilar arriba y abajo cual paletas montadas sobre unas simples bisagras. Antes bien, la punta de cada ala describe un óvalo estrecho muy inclinado. Además, en cada batir las alas cambian de orientación: la cara superior mira hacia arriba durante la carrera descendente, pero luego el ala gira en torno a su eje de modo que la cara inferior mira hacia arriba durante la carrera ascendente.

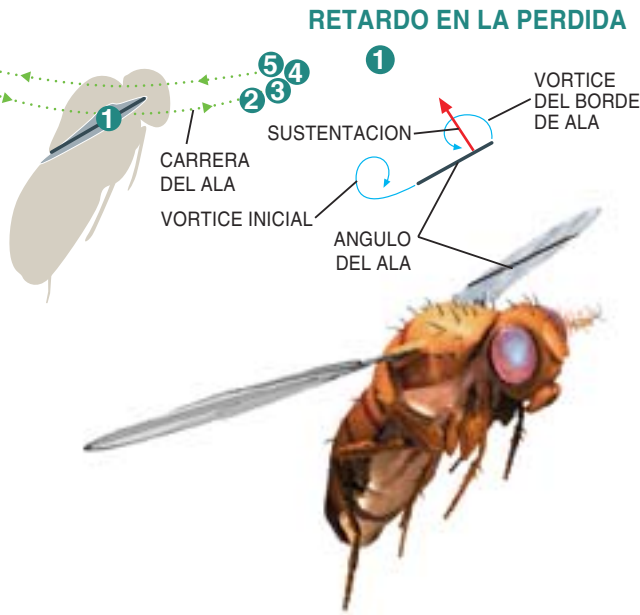
Los primeros análisis del vuelo de los insectos trataron de aplicar a tan complejos movimientos la aerodinámica estacionaria clásica, el planteo adecuado para las alas de avión. Tales intentos no son tan ingenuos como el mal reputado cálculo del abejorro, puesto que tienen en cuenta la variación de velocidad de las alas al batir el aire. Imaginemos que se inmoviliza el ala del insecto en una posición de su carrera, o ciclo de movimiento alar, y que entonces se prueba en un túnel de viento, con una velocidad de viento y una orientación del ala que imiten el movimiento exacto del ala a través del viento en ese instante. Podríamos así medir la fuerza aerodinámica actuante sobre el ala en cada momento.

Si esa teoría estacionaria bastase, la fuerza media, calculada su-

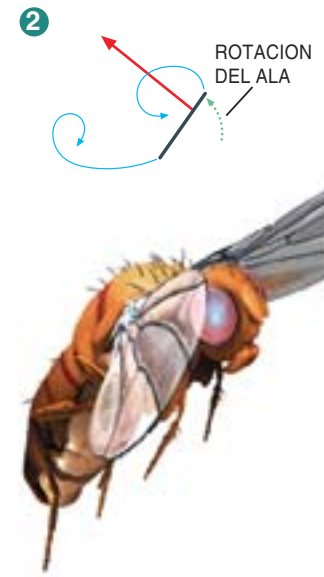
**3. MOSCA INSTRUMENTADA** vista contra el fondo de una arena de realidad virtual (*arriba*). Un ordenador controla los miles de diodos verdes para producir la ilusión (a la mosca) de objetos que se mueven de acuerdo con las maniobras aerodinámicas del animal. Similar arena montada sobre un cardán (*abajo*) simula los virajes, balanceos y guiñadas de un vuelo libre.



**4. LA MOSCA DE LA FRUTA EMPLEA tres mecanismos aerodinámicos diferentes para mantener su peso en el aire. Durante gran parte de la carrera del ala (1), se forma un vórtice de borde de ataque que aumenta la sustentación, proceso llamado retardo en la pérdida de sustentación porque el vórtice no tiene tiempo para desprenderse, que es lo que ocurre cuando un avión entra en pérdida de sustentación. Al final de cada carrera (2, 3, 4), el ala rota, lo que genera una sustentación rotacional similar a la de una pelota de tenis golpeada con contragiro. Al iniciarse la carrera ascendente (5), el ala atraviesa la estela de la carrera descendente. Entonces el ala está orientada de modo que ese flujo de aire adicional añada más sustentación, proceso llamado captura de estela.**



**SUSTENTACION ROTACIONAL**



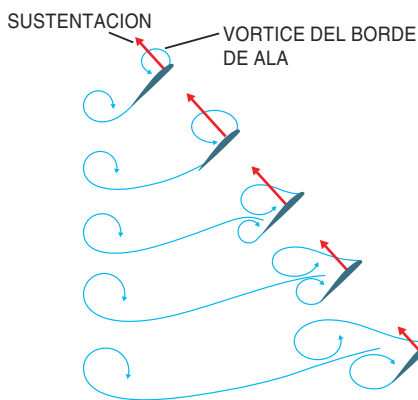
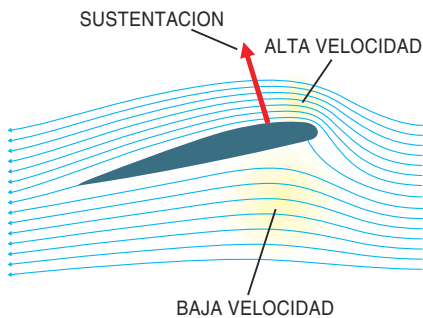
mando las fuerzas para todas las posiciones diferentes del ala a través del ciclo, apuntaría hacia arriba y sería igual al peso del insecto. A comienzos de los años setenta los expertos discrepaban todavía sobre si tal análisis podía explicar de qué modo los insectos se mantienen en el aire. Un decenio después, Charles Ellington, de la Universidad de Cambridge, revisó cuidadosamente todos los datos disponibles y concluyó que el enfoque estacionario no podía responder de las fuerzas necesarias. La búsqueda de unos mecanismos dinámicos “de flujo no estacionario”, capaces de explicar las mejores características funcionales de las alas batientes, despegó con un vigor renovado.

La distribución de velocidades y presiones dentro de un fluido está regida por las ecuaciones de Navier-Stokes, formuladas a principios del siglo XIX. (A los efectos de los análisis aerodinámicos, el aire no es más que un fluido de muy baja densidad.) Si pudiéramos resolver esas ecuaciones para un

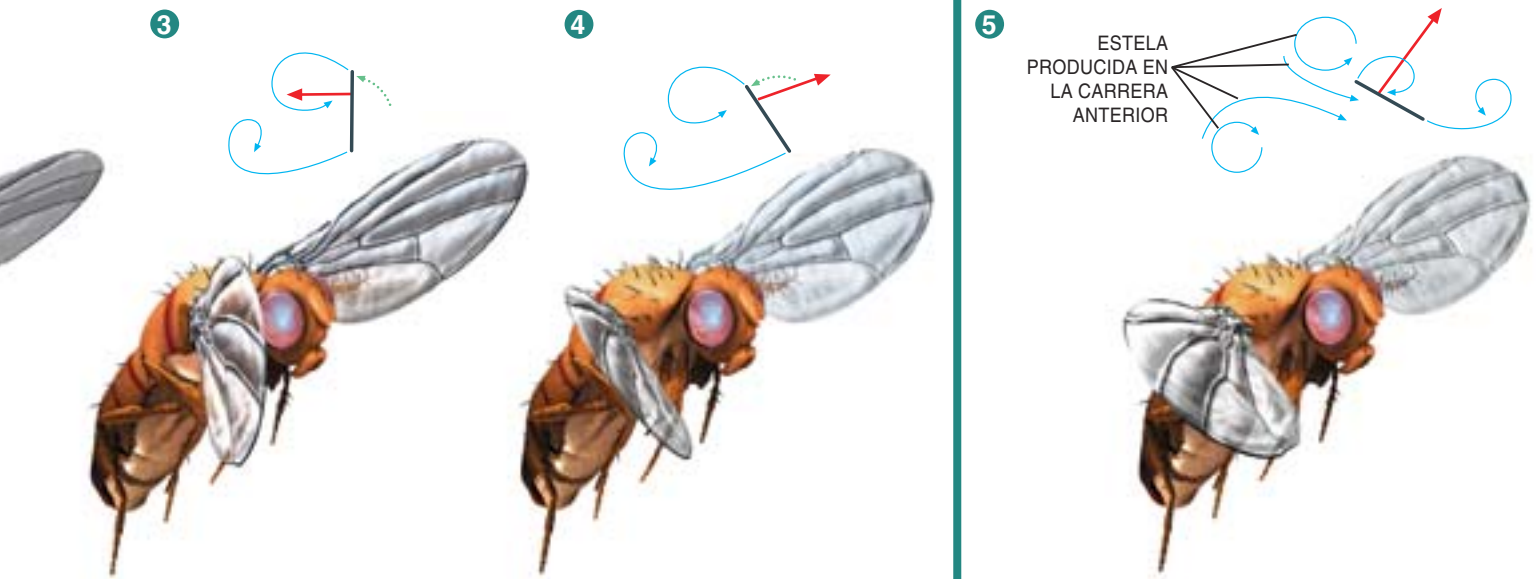
ala batiente de insecto, podríamos describir la aerodinámica entera de su vuelo. Por desgracia, la complejidad del movimiento de las alas hace de éste un problema de simulación que desborda incluso a los ordenadores más potentes.

Si no podemos resolver el problema mediante teoría y cálculo puros, ¿podremos acaso medir directamente las fuerzas generadas por un ala batiente de insecto? Varios grupos han hecho esfuerzos muy valiosos y están desarrollando nuevos e imaginativos enfoques, pero el sutil tamaño y la gran velocidad de las alas dificultan la medición de fuerzas.

Para salvar esas limitaciones, los biólogos que estudian la locomoción animal acostumbran recurrir a modelos en escala, el mismo truco que usan los ingenieros para proyectar aviones, barcos y automóviles. Los ingenieros reducen a escala el tamaño y la velocidad de los vehículos, mientras que los investigadores del vuelo de los insectos aumentan el tamaño de éstas y disminuyen su velocidad hasta valores más manejables. Tales modelos rinden unos resultados aerodinámicos significativos, siempre que cumplan una condición crucial respecto a las dos fuerzas a las que un objeto se encuentra sometido en el seno de un fluido: una fuerza de presión, producida por la inercia del fluido, y una fuerza cortante, o tangen-

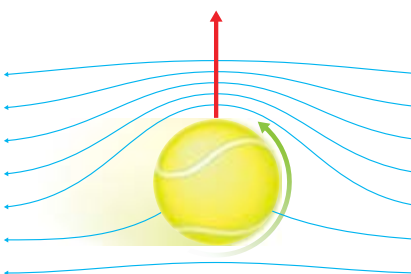


**5. EN UN ALA DE AVION la sustentación se genera por aerodinámica de flujo estacionario (arriba). El flujo no turbulento de la cara superior del ala es más rápido que bajo el ala, generándose una zona de baja presión y una fuerza ascendente. Si el ángulo de ataque es demasiado alto (abajo), el ala entra en pérdida. Cuando ésta se inicia, se forma un vórtice en el borde de ataque con una gran velocidad de flujo, lo que aumenta momentáneamente la sustentación. Pero el vórtice se desprende en seguida del ala, con drástica reducción de la sustentación.**



cial, causada por la viscosidad del fluido.

La fuerza inercial es esencialmente la necesaria para empujar una masa de fluido; es mayor cuanto más denso es el fluido. La viscosidad se parece más al rozamiento; se produce cuando regiones contiguas de un fluido se mueven a velocidades diferentes, y es la que hace tan trabajoso agitar melazas. La física subyacente al animal real y a su modelo es la misma mientras las fuerzas inercial y viscosa tengan la misma relación, llamada número de Reynolds. Esta magnitud adimensional aumenta con la velocidad de un objeto, con su longitud y con la densidad del fluido; pero es inversamente proporcional a la viscosidad del medio. Al ser



**6. EL FLUJO DEL AIRE alrededor de una pelota de tenis golpeada con contragiro genera una suspensión rotacional. Los insectos aprovechan el mismo fenómeno rotando sus alas al final de cada carrera.**

grandes y rápidos, los aviones funcionan con números de Reynolds de entre un millón y 100 millones. Al ser pequeños y lentos, los insectos funcionan con números de Reynolds de entre 100 y 1000, y de menos de 100 para los insectos más pequeños, tales como los tisanópteros, tan nocivos para las plantas.

### El retardo en la pérdida de sustentación

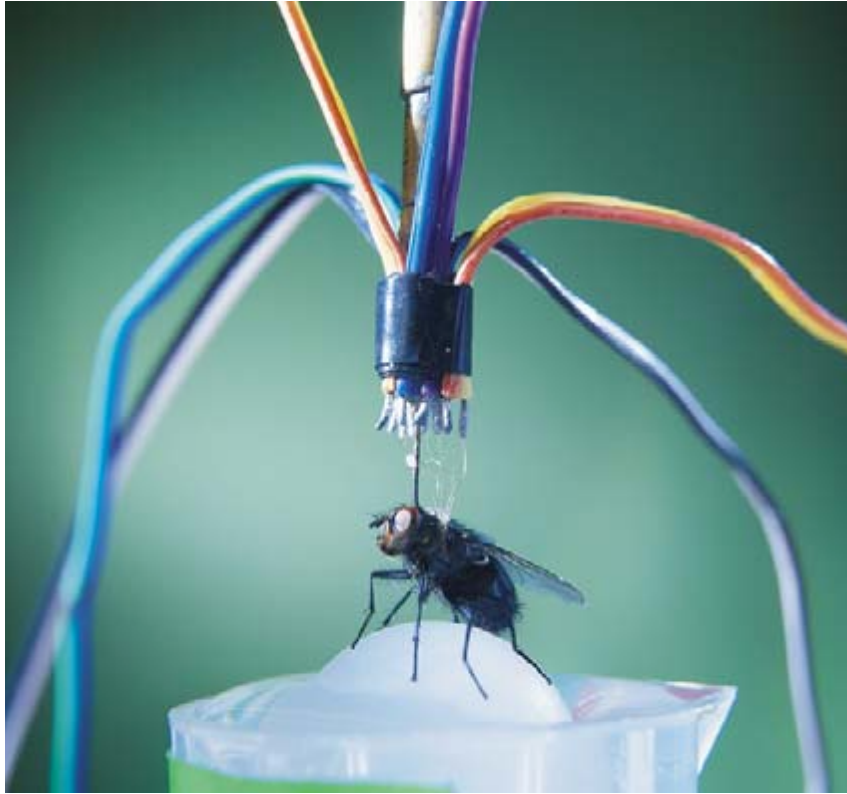
Con el propósito de entender el mecanismo en cuya virtud una mosca de la fruta genera una fuerza aerodinámica, en 1992 Karl Götz y el autor, a la sazón ambos en el Instituto Max Planck de Cibernética Biológica de Tubinga, construyeron un modelo de ala que consistía en una paleta de  $5 \times 20$  cm conectada a una serie de motores que la movían en el interior de un gran tanque de almíbar espeso. Aquella combinación de mayores tamaño y viscosidad, y aletazos más lentos, daba el mismo número de Reynolds y, por tanto, la misma física que un ala de mosca de la fruta batiendo el aire.

Nuestro equipo dotó al ala con un sensor de fuerza para medir la sustentación y la resistencia al avance generadas al moverse en el seno del pegajoso líquido. Pusimos cantoneras o deflectores en los extremos de las alas para inhibir el flujo a lo largo de la longitud y

del borde del ala. De esta técnica acostumbran servirse los modelos aerodinámicos sencillos, que, aunque simplifica el análisis al reducir el flujo de tres a dos dimensiones, comporta el riesgo de omitir efectos importantes.

Nuestros experimentos con este modelo de ala y los trabajos de otros laboratorios nos ayudaron a descubrir una posible solución al enigma del vuelo de los insectos: el retardo en la pérdida de sustentación. En un avión, hay pérdida de sustentación (se dice que entra en pérdida) si el ángulo bajo el que el ala corta al viento, el ángulo de ataque, es demasiado empinado. Para ángulos de ataque poco inclinados, el aire se divide en dos en el frente del ala y fluye suavemente en sendas corrientes por las superficies superior e inferior. El flujo superior es más rápido, con lo que la presión sobre la cara superior del ala es menor y se produce un efecto de succión ascendente sobre el ala, generándose así la fuerza de sustentación. Pero si el ángulo de ataque es demasiado empinado, el flujo superior no puede seguir el contorno del ala y se separa de ésta, con el resultado de una catastrófica pérdida de sustentación.

¿Cómo puede ser que la pérdida de sustentación, desastrosa para un avión, contribuya a la sustentación de un insecto? La respuesta reside en la velocidad del



**7. MOSCARDA INSTRUMENTADA** para estudiar la relación de la actividad eléctrica en los músculos de dirección con los cambios en los movimientos de las alas que tienen lugar durante las maniobras de dirección.

aleteo. Las alas no pierden la sustentación instantáneamente; tras aumentar el ángulo de ataque, el flujo generador de la sustentación tarda un tiempo en desbaratarse. De hecho, en una fase inicial del fenómeno la sustentación aumenta brevemente en virtud del vórtice del borde de ataque, una estructura de flujo transitoria. Un vórtice es un flujo circular o espiral, como el que se presenta en los tornados o en el remolino en el desagüe de una bañera que se vacía.

El vórtice del borde de ataque se forma justo encima y detrás del borde de ataque del ala, a modo de remolino cilíndrico largo, puesto de canto. En el vórtice el flujo del aire es muy rápido y su consiguiente baja presión produce una sustentación adicional importante. Este efecto fue reconocido por ingenieros aeronáuticos ingleses a comienzos de los años treinta, pero resulta demasiado breve en su duración para aprovecharlo en la mayoría de las aeronaves. Con gran rapidez, el vórtice se separa del ala y es despedido hacia la estela del avión, disminuyendo en picado la sustentación, con la caída consiguiente del aparato. Los aleteos de los insectos son tan breves, que el ala gira y cambia de sentido, produciendo un nuevo vórtice de sentido contrario, inmediatamente

después de haber sido despedido el anterior.

Estos resultados, obtenidos con modelos bidimensionales simples, Ellington y su grupo de Cambridge los extendieron a tres dimensiones. Era a mediados de los años noventa. Estudiaron el vuelo de la gran *Manduca sexta*, o esfinge, instrumentada en un túnel de viento, así como el de una mariposa nocturna robótica tridimensional. Las líneas de humo revelaron la presencia de un vórtice pegado a los bordes de ataque de las alas durante las carreras descendentes. Sugirió el equipo de Ellington que había, además, un flujo axial desde la base hasta la punta de las alas que intensificaba el efecto reduciendo la fuerza del vórtice pero aumentando su estabilidad y permitiendo que siguiera unido a las alas durante toda la carrera. Ese flujo axial podría adquirir una importancia particular en insectos grandes, tales como esfinges y libélulas que agitan sus alas con carreras más largas.

Aunque la identificación de ese efecto resolvió una buena porción del misterio, algunas series de hechos sugerían que los insectos hacen uso de otros mecanismos, además del retardo en la pérdida. Primero, la fuerza adicional producida por el retardo en la pérdida basta para explicar cómo un

insecto se mantiene en el aire, pero no basta para explicar por qué numerosos insectos pueden izar casi dos veces su propio peso. Segundo, algunos investigadores han intentado medir las fuerzas que crea un insecto instrumentándolo con un transductor sensible a las fuerzas. Tales experimentos hay que contemplarlos con cautela, ya que un animal instrumentado puede que no se comporte igual que otro en vuelo libre; sin embargo, la exacta sincronización de las fuerzas no explica fácilmente el retardo en la pérdida. Así, cuando Götz empleó una técnica de difracción de láser para medir las fuerzas generadas por una mosca de la fruta, descubrió que las fuerzas más intensas se daban durante la carrera ascendente, en un momento en que cabría esperar que las fuerzas resultantes del retardo fueran febles.

Buscando nuevos mecanismos no estacionarios, en 1998 Fritz-Olaf Lehman, Sanjay P. Sane y el autor construyeron un modelo de gran tamaño de una mosca de la fruta, *Drosophila melanogaster*, la Robomosca mencionada. El aceite mineral viscoso del tanque hace que el aleteo, una vez cada cinco segundos, de las alas robóticas de 25 centímetros sea dinámicamente semejante a los 200 aleteos por segundo de las alas de 2,5 milímetros de una mosca de la fruta en el aire. Gracias a nuestra reconstrucción artificial medimos dos características críticas: las fuerzas aerodinámicas sobre las alas y el flujo presente a su alrededor, ambas magnitudes casi imposibles de determinar en la mosca real. Además, si bien Robomosca se proyectó para imitar a una mosca de la fruta, programando los seis motores que accionan ambas alas, podemos recrear el movimiento de las alas de numerosas especies de insectos. Podemos también hacer que Robomosca aletee de cualquier modo requerido para comprobar hi-