



# Motores mínimos (I)

Cinco motores extraordinariamente simples permiten demostrar toda una variedad de principios físicos

**H**ace ya más de una década, mi buen amigo Julio Güémez, profesor de la Universidad de Cantabria, me dejó boquiabierto: tomó una pila de 1,5 voltios, un pequeño imán, un clavo de acero y un retal de hilo de cobre y, con estos elementos, construyó ante mis ojos un motor eléctrico. «Es el motor homopolar», me explicó. Caí fascinado ante lo simple de aquel artefacto: constaba solo de lo imprescindible para funcionar; nada le era superfluo. Se trataba, sin duda, del motor más sencillo imaginable. Aquel día, en secreto y ante el imán girando a toda velocidad, decidí investigar más motores mínimos.

Lo que sigue es el resultado de esa exploración. Como veremos, la búsqueda de la simplicidad experimental deja un enorme campo abierto al científico aficionado, al docente o al alumno que desee enfrascarse en un trabajo de investigación. Pospondremos los detalles del motor homopolar para una próxima colaboración, en la que nos centraremos en él y en todas sus variantes, y empezaremos por los motores mínimos más humildes.

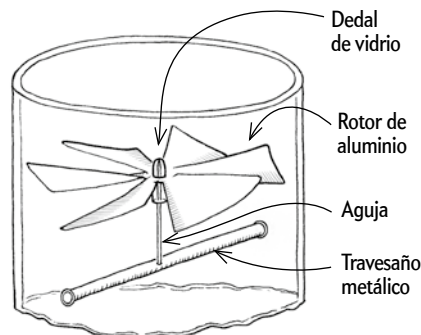
En realidad, a todos nos gustan los motores mínimos. ¿Quién no ha jugado alguna vez con un **molinillo de viento**? Tomamos un papel cuadrado, hacemos cuatro cortes y otros tantos dobleces, y atravesamos el centro con una aguja que insertamos en un palo. Al orientarlo contra el viento, nuestro rotor girará veloz y silencioso: un juguete didáctico que deja embelesados a pequeños y mayores.

Sin embargo, el experimentador descubrirá pronto que este pequeño ingenio deja mucho que desear. El agujero central se desgasta con rapidez y el rotor empieza a cabecear: una señal de que el punto de rotación requiere mejoras. Y si el molinillo se deja fijo (por ejemplo, clavándolo en una maceta), será necesario incorporar algún sistema que lo oriente hacia el viento, ya que de lo contrario perderemos la fuerza motriz.

Es aquí donde comienzan las dificultades técnicas. ¿Cuál será el sistema de giro más simple? ¿Y cuál el método de orientación óptimo? ¿Puede mejorarse el diseño del rotor? El reto consiste en resolver estas dudas con una economía de medios espartana. Por lo demás, el



**TORRE TERMOSOLAR:** El aire caliente asciende por el interior del tubo y acciona un diminuto rotor. La clave de su buen funcionamiento reside en el bajo rozamiento del buje: un pequeño dedal de vidrio apoyado sobre una fina aguja. Abajo detalle del rotor y del eje de giro.



molinillo de viento resulta encantador: transforma la energía cinética «lineal» del viento en energía cinética de rotación, la cual resulta fácil de convertir en trabajo aprovechable. Como ejemplo de sus aplicaciones, pensemos en molinos harineros de viento, en las bombas de agua eólicas o en los aerogeneradores.

Más allá del desafío eólico, podemos plantearnos otros retos. ¿Será posible aprovechar la energía solar? Hay pocos motores que conviertan la radiación solar en energía mecánica, y menos aún que lo hagan de forma sencilla. Quizás el más básico sea la **torre termosolar**, también conocida como **motor de Leonardo**. Su nombre se debe a uno de los inventos del gran visionario renacentista: un dispositivo automático para asar la carne al fuego. Este empleaba como fuerza motriz el aire caliente que ascendía por una chimenea, el cual hacía girar unas aspas que, a su vez, daban vueltas al asado.

Nosotros haremos algo muy similar: una réplica en miniatura de las gigantes instalaciones que hoy en día aprovechan el calor del sol para generar una corriente de aire ascendente y, de esta manera, accionar un rotor al que se conectan generadores u otras máquinas.

El diseño de este motor es simple. Se compone de un largo tubo vertical (yo empleé metacrilato, aunque puede fabricarse con cualquier material) en cuyo interior se coloca un rotor parecido a las aspas de un ventilador doméstico en miniatura. Para fabricarlo, cortaremos un disco de chapa de aluminio de dos o tres décimas de milímetro de espesor, el cual deberá tener un diámetro ligeramente inferior al del interior del tubo. En su centro haremos un agujero de unos 3 o 4 milímetros de diámetro; después, practicaremos seis cortes radiales, equidistantes y que lleguen casi al agujero central y, con unos alicates, los doblaremos para que adopten un aspecto de hélice. Por último, en el orificio central



LOS CINCO MOTORES cuya construcción y funcionamiento se describen en este artículo. De izquierda a derecha: molinete electrostático, torre termosolar, radiómetro de Crookes, molinillo de viento y motor de Franklin.

engastaremos un pequeño dedal de vidrio, el cual descansará invertido en la punta de una aguja.

Ese dedal ejercerá una función clave tanto en este motor como en otro de los que describiremos más abajo, por lo que merece la pena detenerse un minuto en él. Para fabricarlo, buscaremos un tubo de vidrio de laboratorio de 4 o 5 milímetros de diámetro. En mi caso solo disponía de uno de 8 milímetros, por lo que me vi obligado a reducirlo. El proceso es el mismo que el que seguiríamos para hacer un cuentagotas. Primero se calienta el tubo sobre la llama de un mechero Bunsen girándolo entre los dedos y, una vez caliente, se estira hasta que alcance el diámetro deseado. Luego se deja enfriar, se rompe, se cierra el extremo al calor de la llama y se recorta después con una pequeña lima de diamante. Durante el proceso resulta práctico emplear una varilla de hierro con punta semiesférica y cuyo diámetro coin-

cida con el diámetro interior deseado del tubo (unos 4 milímetros, en nuestro caso). Tras introducir la varilla en el tubo de vidrio, podremos moldear más fácilmente nuestro diminuto dedal. Como el lector imaginará, no se consigue a la primera. Yo tuve que hacer varias decenas, cada uno más pequeño que el anterior, hasta conseguir uno útil.

Al colocarlo invertido sobre una aguja, nuestro pequeño dedal de vidrio presenta un rozamiento extraordinariamente bajo. Tanto es así que, en el caso del motor termosolar, comprobaremos cómo el rotor comienza a girar con solo poner la mano a algunos centímetros bajo la boca inferior del tubo. En el modelo que mostramos aquí, el tubo se ha instalado sobre una semiesfera de metacrilato con grandes perforaciones, dentro de la cual hay otra semiesfera de aluminio pintada de negro con un spray. La función de estas semiesferas es producir un intenso efecto

invernadero: la de aluminio absorbe la radiación solar y calienta el aire circundante; este, que no puede escapar, pues se lo impide la esfera de metacrilato, asciende por el tubo y hace girar el rotor.

Al situar el instrumento ante una ventana soleada podremos ver que, en efecto, el rotor se mueve con rapidez. Si, además, hay un radiador bajo la ventana, podremos fijar el tubo al vidrio con unas ventosas: será un práctico método de detectar si tenemos la calefacción en marcha. Una versión de poco tamaño colocada sobre cualquier fuente de calor residual se mantendrá en constante rotación. Acabamos de construir un motor que funciona gracias al movimiento ascensional de aire caliente y que, si lo hace tan bien, es gracias al exiguo rozamiento del soporte.

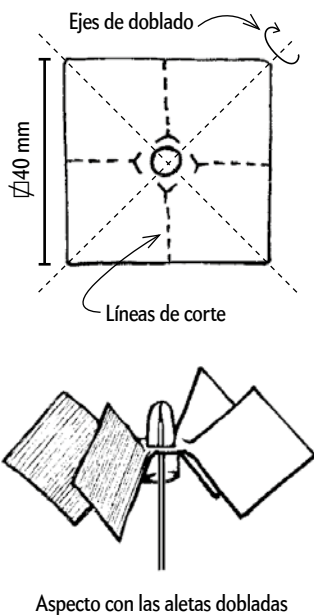
Ese soporte de cristal, que recuerda a un pequeñísimo tubo de ensayo, resultará clave si lo que queremos es dar un paso más y construir uno de los motores



mínimos más bellos: **el radiómetro de Crookes**, conocido también como **molinillo solar**. Antes de proseguir, debemos advertir de que nadie debería intentar fabricar este motor si no dispone de una buena bomba de vacío y de una voluntad inquebrantable.



**RADIÓMETRO DE CROOKES:** Uno de los motores mínimos más difíciles de construir. El que mostramos aquí ha sido instalado en el interior de un tarro de mermelada en el que previamente se ha hecho el vacío. Abajo, líneas de corte para la fabricación del rotor (esquema superior) y detalle del dispositivo montado sobre su eje de giro (inferior).



Este aparato consta de un rotor de cuatro palas colocadas en posición vertical, reflectantes por una cara y de color negro mate por la otra. Encerrado al vacío en una ampolla de vidrio, el rotor girará cuando quede expuesto a una fuente de luz intensa. Al contrario de lo que quizá cabría pensar, su movimiento no obedece a la presión de radiación de la luz incidente, sino a la diferencia de temperatura entre las moléculas de aire residuales situadas a ambos lados de cada paleta. En este caso, las fuerzas motrices son tan diminutas que el rozamiento debe ser mínimo. Por esa razón, el dedal de vidrio se torna aquí imprescindible.

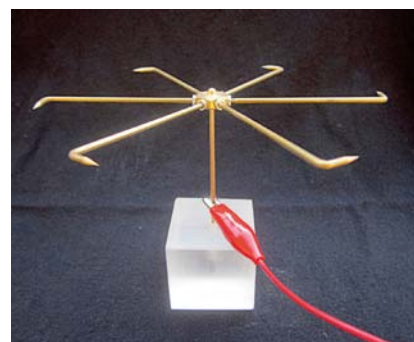
Una vez hayamos preparado un nuevo dedal siguiendo las instrucciones que dábamos más arriba, procederemos a fabricar el rotor del radiómetro. En una chapa de aluminio de pocas décimas de milímetro de espesor, cortaremos un cuadrado de 40 milímetros de lado y puliremos una de sus caras hasta dejarla como un espejo. Para ello podemos utilizar pulimento líquido para carrocerías o un disco rotatorio de trapo con pulimento en pasta. Marcamos las líneas de corte y, en el centro, practicamos un agujero algo menor que el dedal. Luego cortamos las paletas con un cúter y, con unas tenazas de puntas, las doblamos 90 grados hasta que queden verticales. Lógicamente, deberemos observar una perfecta simetría entre las palas y armarnos de paciencia para equilibrar un elemento tan liviano. Tras ello solo nos quedará introducir el dedal en el agujero de la chapa de aluminio, asegurar su posición con una gota de cianocrilato y ennegrecer la cara no pulida de los álabes con la llama de una vela.

Entretanto habremos preparado el recipiente de vacío. Lo más práctico quizá sea tomar un pequeño bote de conservas, taladrar su tapa y conectarlo a una bomba de vacío. En nuestro caso hemos usado componentes de fontanería y soldado con estaño todas las conexiones, ya que garantizar un buen vacío es imprescindible. Más aún: no cualquier bomba nos servirá. La mía, más bien sencilla, solo lograba un vacío suficiente para que el rotor girase muy despacio bajo la luz del sol. Todo pareció mejorar cuando introduje en el tarro unos trozos de sodio metálico que, al parecer, absorbieron algunos gases. El experimentador falto de una bomba de vacío potente puede investigar en esta línea: la absorción de gases residuales por vía química. Pese a todas estas dificultades, el esfuerzo vale la pena; pocos motores mínimos hay

con mayor magia que el radiómetro. Además, su construcción nos habrá permitido ganar una importante experiencia con las técnicas de bajo rozamiento.

Así pues, cambiemos de fuerza motriz pero sin abandonar los montajes basados en la suspensión en punta. Hay un motor mínimo que lleva más de dos siglos rondando por los laboratorios docentes: **el molinete electrostático**. Consta de un rotor dotado de dos o más radios metálicos terminados en finísimas puntas, que, conectado a una fuente de alta tensión, girará en dirección contraria a ellas.

El rotor debe construirse en torno a una pieza central de latón en la que habremos practicado un agujero cónico tan profundo como sea posible. En su perímetro, y por cualquier medio, montaremos dos o más varillas de idéntica longitud, muy bien afiladas y con las puntas dobladas



**MOLINETE ELECTROSTÁTICO:** Motor accionado por el efecto punta. El principal reto consiste en lograr un equilibrio perfecto entre los radios del rotor.

90 grados. El prototipo que reproducimos aquí cuenta con seis de tales puntas.

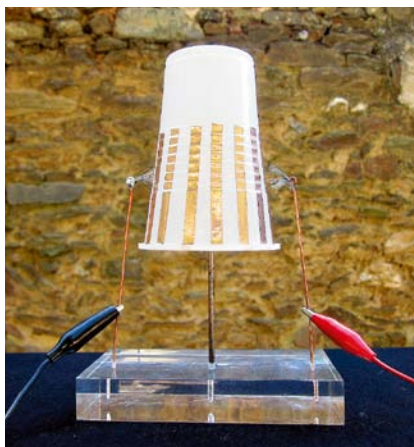
El reto consiste en equilibrar bien el rotor y en hacer las puntas casi perfectas. Antes, de hecho, al hablar del dedal de vidrio, casi no hemos mencionado la aguja que lo soporta. Cuando esta puede ser delgada y no demasiado larga, lo mejor es utilizar una simple aguja de coser. Sin embargo, para construir el molinete eléctrico necesitaremos un soporte más alto y rígido.

Cualquier varilla metálica puede aguzarse colocándola en el portabrocas de un taladro y haciéndola girar bajo un ángulo muy agudo sobre papeles abrasivos cada vez más finos. Al final, podremos pulirla con un disco de trapo hasta dejarla brillantada. El criterio es que una buena aguja debe clavarse sin dificultad

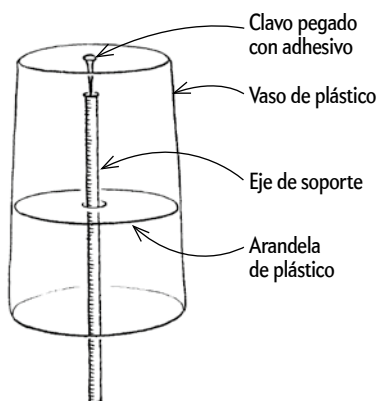
en la piel de los dedos y marcar fácilmente la uña.

Así pues, buscaremos una varilla de acero de dos o tres milímetros de diámetro y, una vez aguzada, la fijaremos a una base aislante; en nuestro caso, un cubo de metacrilato. Montaremos sobre ella el rotor, dejándolo descansar sobre la aguja y colocando esta en el interior del agujero cónico que habíamos hecho en la pieza central de latón.

Por último, con unas pinzas de cocodrilo, conectaremos la aguja a un generador electrostático. Con una máquina de Wimshurst, típica de laboratorio escolar, el molinillo funcionará a la perfección, si bien resultará insensible a cargas electrostáticas muy reducidas.



**MOTOR DE FRANKLIN:** Eficiente y fácil de construir, este motor opera gracias a la acumulación de carga eléctrica en una de las escobillas y su transmisión al polo opuesto. El bajo rozamiento se consigue mediante un clavo bien afilado, apoyado sobre una varilla en cuyo extremo superior habremos practicado un fino agujero. Aquí mostramos una versión de bajo coste construida en un laboratorio escolar. Abajo, detalle del interior del dispositivo



## SI TE INTERESA ESTE TEMA...

Descubre *Taller y laboratorio*, un monográfico de la colección TEMAS de *Investigación y Ciencia* que recopila algunos de los mejores experimentos propuestos en esta sección durante los últimos años.

[www.investigacionyciencia.es/revistas/temas/numero/74](http://www.investigacionyciencia.es/revistas/temas/numero/74)



Este motor funciona por efecto punta; es decir, por la acumulación de carga en las finas puntas de metal. El intenso campo eléctrico generado por dicha acumulación ioniza las moléculas del aire circundante, que, al adquirir una carga del mismo signo, genera una ligera repulsión. Con todo, la masa del rotor y el rozamiento con el cubo central de latón condicionarán una baja velocidad de giro.

Por suerte, y sin abandonar la alimentación electrostática para nuestros motores, podemos optar por otros diseños más eficientes. Uno de ellos es el **motor de Franklin**, un motor mínimo que, además de funcionar gracias a la repulsión entre cargas, también las transporta, por lo que goza de un movimiento más regular y rápido. Los primeros modelos se hacían con latón, médula de saúco o pan de oro, pero en pleno siglo XXI disponemos de materiales mucho mejores.

Construiremos la parte giratoria con un vaso de plástico. En el centro de la base haremos un agujero, por el cual introduciremos y pegaremos un pequeño clavo al que habremos aguzado la punta. En el interior, a media altura, fijaremos un disco de plástico con un orificio central, por este pasará una varilla vertical que hará las funciones de eje. En el exterior del vaso pegaremos tiras de cinta metálica autoadhesiva. La varilla vertical tiene, en su cara plana superior, un diminuto orificio cónico practicado con la punta de una broca de dos o tres milímetros. En él se alojará el clavo que antes habíamos pegado al fondo del vaso.

Después buscaremos una base de material plástico y haremos en ella tres agujeros con un taladro. El del centro alojará la varilla vertical, mientras que los otros dos servirán para albergar sendos alambres de cobre que, rematados por unos hilos más finos, ejercerán de escobillas. Por último, al conectar cada uno de ellos a un polo de un generador, el vaso comenzará a girar. La sensibilidad de este minúsculo motor de Franklin es tanta que, para que

funcione, basta con la pantalla de un televisor de rayos catódicos. Solo hace falta cubrir la pantalla con papel de aluminio, conectarla a un polo del motor, unir el otro a una toma de tierra y... ¡listo!

¿Qué mecanismo acciona el dispositivo? Cuando conectamos una de las escobillas a cualquier elemento con carga eléctrica, la tira metálica más próxima a la escobilla adquirirá la misma carga, por lo que aparecerá una fuerza de repulsión. El vaso girará una fracción de vuelta y expondrá una nueva tira metálica a la escobilla. Poco a poco, las tiras metálicas cargadas se acercarán a la segunda escobilla, conectada a tierra, por lo que experimentarán una atracción que se sumará a la repulsión anterior. Por supuesto, las tiras se descargan al llegar a ella y vuelven a cargarse al regresar a la primera escobilla. El ciclo se repite una y otra vez. Dependiendo de la bondad de la construcción, el movimiento puede llegar a acelerarse de forma espectacular.

Hasta aquí nuestra primera entrega, dedicada a los motores más simples. Sin embargo, la búsqueda continúa: hacemos un llamamiento a todos aquellos lectores que conozcan otros artefactos capaces de convertir pequeñas cantidades de energía en movimiento mecánico para que nos envíen sus descripciones y sugerencias. Pueden hacerlo en forma de comentario en el blog del autor o mediante un correo electrónico a [redaccion@investigacionyciencia.es](mailto:redaccion@investigacionyciencia.es). Con un poco de suerte, aparecerán en estas mismas páginas. 📺

### PARA SABER MÁS

El blog del autor aloja varios vídeos que muestran los distintos motores en funcionamiento: [www.investigacionyciencia.es/blogs/tecnologia/14](http://www.investigacionyciencia.es/blogs/tecnologia/14)

### EN NUESTRO ARCHIVO

El molinete de luz. Wolfgang Bürger en *IyC*, junio de 2001.