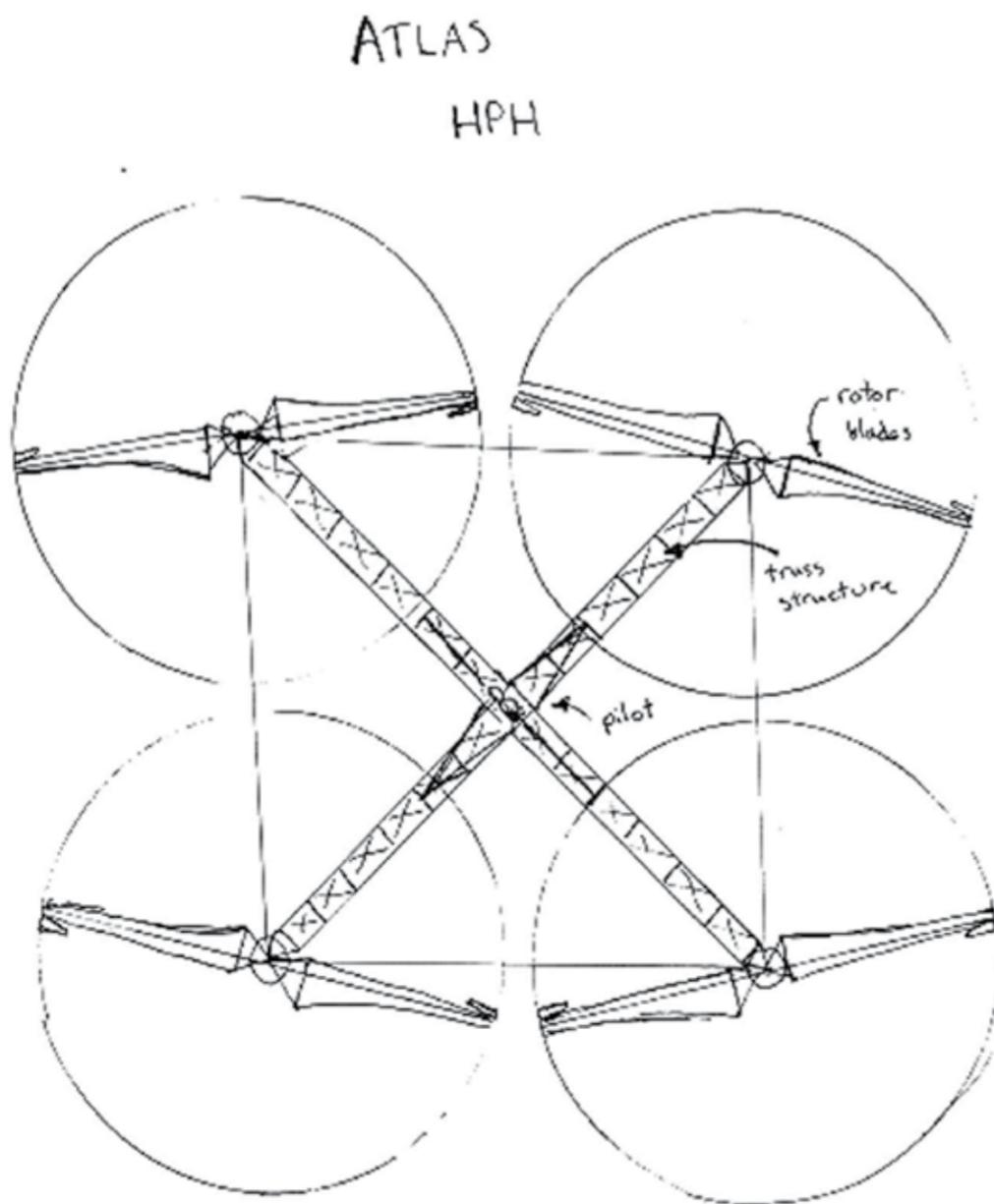


¿Cuánta energía necesita para volar?



Esbozo del diseño del helicóptero Atlas.

W. LUIS MOCHÁN

Instituto de Ciencias Físicas, UNAM
Academia de Ciencias de Morelos

La energía sí que es un concepto raro. Algunos de los lectores recordarán aquella época en que las transmisiones de los automóviles solían ser manuales y en las que era común arrancar el motor de un vehículo al que se le hubiese agotado la batería empujándolo. Resulta que si usted empuja un vehículo tan pesado que no lo logra mover, aún haciendo el mayor esfuerzo del que es capaz, el trabajo que realice ¡será nulo, cero, nada! En cambio, si pide ayuda a uno o varios amigos y con su apoyo lo logran mover, el trabajo que usted realice será positivo y estará dado por el producto de la fuerza aplicada multiplicada por la distancia recorrida. Haga la prueba, empuje un automóvil, aunque sea ligero, y notará cómo se cansará más rápidamente si lo ayudan que si no lo ayudan, siempre y cuando *en ambos casos usted empuje con la misma fuerza*. —No me ayudes compadre—

estará usted tentado a decirle a su amigo, pero sería injusto: Con ayuda se cansa más pues hace más trabajo, pero tiene mayores logros.

Lo que quise este ejemplo ilustra es un concepto fundamental pero muy simple, *sin movimiento no hay trabajo*. Los muros de su casa no gastan energía en detener al techo, los cimientos de un rascacielos no gastan energía en cargar el peso de todo edificio. ¿Por qué? Porque no hay movimiento. —Pero cuando yo cargo pesas me canso, aunque no me mueva— protestará con razón algún lector, y tendrá razón, pero eso se debe a la naturaleza dinámica de la contracción muscular. Cuando un músculo se tensa, un gran número de fibras se deslizan unas sobre otras bajo la acción de proteínas como la miosina, que literalmente *camina* sobre un filamento mientras arrastran otro, dando pequeños pasos de uno a siete nanómetros de longitud cada uno (un nanómetro es la millonésima parte de un milímetro) y 'descansando' entre uno y otro paso. Cuando un músculo se ten-

sa *isométricamente* sin contraerse, sin cambiar su longitud, se debe a que alguna otra fuerza, ya sea externa o producida por otro músculo, ejerce una fuerza que hace que la miosina resbale hacia atrás entre paso y paso. Algo análogo sucedería si usted intentara arrastrar inútilmente una pesada carga a través de un campo enlodado; sus piernas se moverían pero sus pies resbalarían en el lodo. Haría trabajo, pero no sería trabajo *útil* sobre la carga.

¿Cuánta energía se necesita para volar? De acuerdo a nuestra discusión anterior, la respuesta es simple: *ninguna*. —¿Cómo?— protestará el lector, —¿qué, los aviones no requieren de enormes motores para surcar los cielos?— Es cierto, por ejemplo, un avión Boeing 787 emplea dos motores Rolls-Royce Trent, cada uno capaz de acelerar al despegar 1.3 toneladas de aire cada segundo con una fuerza de 330 kN hasta una velocidad de aproximadamente 250 m/s (alrededor de 900 km/h), proporcionándole una energía de 82.5 millones de Joules cada segundo, i.e., una potencia de

82.5 megawatts (y seguramente disipando al menos una cantidad igual como calor, consumiendo con ello cerca de 160 millones de Watts). Como comparación, considere que el motor de un automóvil compacto tiene una potencia de alrededor de 150 *caballos de fuerza* (CF), equivalentes a 112 mil Watts. Luego, cada motor de avión genera la potencia de ¡más de 700 motores automotrices!

Aunque dramático, el ejemplo anterior no es del todo adecuado, pues un avión está diseñado para surcar el aire a altas velocidades, alrededor de 900 km/h. Debemos entonces reformular la pregunta: ¿cuánta energía se necesita para volar *sin movernos*, simplemente para separarnos del piso? Ahora sí estará de acuerdo, querido lector, en que no se requiere energía para sostenernos estáticos en el aire. —No— protestará usted de nuevo, —¿qué no los helicópteros están diseñados para quedarse quietos en el aire, empleando para ello mucha energía?— De nuevo tendría razón. Por ejemplo, el motor de un helicóptero Sikorsky CH-53K proporciona una potencia útil en el eje de 18 mil CF, equivalentes a 13.5 millones de Watts. Claro, este es un helicóptero enorme, con capacidad para 40 pasajeros. Pero aún el motor de un helicóptero pequeño como el Sikorsky S-300CBi para dos pasajeros proporciona al eje una potencia de 180 CF (135 kW).

Sin embargo, podría argumentarse, un zeppelin es capaz de volar sin consumir absolutamente nada de energía, simplemente por estar inflado con un gas como helio, menos denso que el aire. Un globo aerostático deportivo vuela por estar inflado con aire caliente, más ligero que el aire frío que lo rodea, y sólo consume una cantidad minúscula de energía para calentar inicialmente el aire que emplea. —Pero esos son vehículos más ligeros que el aire— protestaría usted de nuevo. Efectivamente, al despegar, el peso de un zeppelin es menor que el peso del aire desplazado por su volumen. Es por ello que la presión ejercida por el aire en la parte baja del aerostato produce al actuar sobre su superficie una fuerza ascendente que, después de compensar la fuerza ejercida por el aire sobre su parte superior, puede empujar hacia arriba a la nave con una fuerza de *flotación* que la hace ascender hasta llegar a la altura deseada, en la cual la fuerza de flotación compensa exactamente al peso. Permítame entonces reformular una vez más la pregunta. ¿Cuánta es la potencia mínima que se requiere para mantener volando una nave más pesada que el aire que desplaza? ¿Tendría, por ejemplo, un ser humano, la capacidad de impulsar con sus



Detalle de uno de los rotores.

propios músculos un helicóptero capaz de sostener en el aire su propio peso?

Para responder las nuevas preguntas, debemos responder una pregunta previa, ¿por qué un helicóptero, en contraste con un globo, necesita energía para volar? Podemos hallar una respuesta sencilla basándonos en las leyes de la física fundamentales como son la *ley de gravedad*, la *segunda ley de Newton* y la *ley de conservación del ímpetu*. Considere un vehículo volador más pesado que el aire, con cierta masa a la que denotaremos por M . Por hallarse cerca de la superficie de la Tierra, el vehículo es sujeto a una fuerza de gravedad $F_g = Mg$ dirigida hacia abajo, donde g es la aceleración de la gravedad, cuyo valor es aproximadamente de 10 m/s^2 . De acuerdo a la segunda ley de Newton, esta fuerza puede interpretarse como la cantidad de ímpetu que *se mete* al helicóptero cada segundo. El lector recordará que el ímpetu es simplemente el producto de masa por velocidad. Si el helicóptero no cae, si no adquiere una velocidad descendente, es porque el helicóptero *no se queda* con el ímpetu que le proporciona la gravedad. El ímpetu se conserva, no se destruye, de manera que el ímpetu que no acumula el helicóptero debe ser proporcionado a algo más. El lector ya adivinó seguramente que el helicóptero, a través de sus hélices, le proporciona este ímpetu al aire; cada vez que transcurre un tiempo t , una masa m de aire adquiere una velocidad v llevándose así el

ACADEMIA DE CIENCIAS DE MORELOS, A.C.

¿Comentarios y sugerencias?, ¿Preguntas sobre temas científicos? CONTÁCTANOS: editorial @acmor.org.mx



radio de la hélice $P=a M^{3/2}/r$; haciendo la hélice suficientemente grande podemos hacer la potencia tan pequeña como queramos. La única limitación es la que impone la resistencia de los materiales empleados. Usando la densidad del aire de aproximadamente un kilogramo por metro cúbico obtenemos la constante $a=1/2 g^{3/2}/(\pi\rho)^{1/2}=9m^3/s^3kg^{1/2}$.

Si quisieramos diseñar un helicóptero que nos permita volar impulsado por nuestros propios músculos, la masa deberá ser algo mayor a la de nuestro cuerpo. Consideremos pues, una masa de alrededor de 150Kg. Un atleta puede producir hasta dos mil watts de potencia, pero sólo durante un instante. A un ritmo sostenido, una persona entrenada podría producir alrededor de 200W. Durante unos minutos quizás podría producir una potencia intermedia, digamos $P=500W$. Sustituyendo estos valores y la densidad del aire, de aproximadamente un kg por metro cúbico en nuestras fórmulas obtenemos $r=a M^{3/2}/P=33m$. ¿Podrá construirse un helicóptero con características similares?

Desde luego, no somos los primeros en hacernos esta pregunta. En 1980 la *Asociación Americana de Helicópteros Internacional* estableció un premio, el *Premio Igor Sikorsky AHS* para quien pudiera fabricar un helicóptero propulsado por ener-

gía humana capaz de mantenerse en el aire a una altura de al menos 3 metros y sostener su altura durante al menos 3 minutos controlando el vuelo para que el centro de la nave no abandonara un cuadrado de 10 por 10 metros. Inicialmente, se ofreció un premio de \$10,000 dólares, aunque poco después esta cantidad se incrementó a \$25,000 dólares y en 1994 se incrementó de nuevo hasta \$250,000. No fue sino hasta hace poco más de un año que, el 13 de junio de 2013 que *AeroVelo*, un equipo de estudiantes de la Universidad de Toronto, demostró que su cuadróptero de propulsión humana, llamado *Atlas*, se pudo sostener en el aire 64 segundos alcanzando una altura de 3.3 metros y sin alejarse más de 10 metros de su posición inicial. Por ello, *AeroVelo* recibió el premio *Sikorsky* el 11 de julio de 2013. El diámetro del *Atlas* es de 47 metros, haciéndolo el segundo más grande de todos los vehículos voladores de propulsión humana. La potencia proporcionada por su piloto tuvo un máximo de 1.1kW pero inmediatamente se redujo a alrededor de 600W. Estos parámetros son cercanos a los resultados de nuestros cálculos arriba.

Hemos mostrado que con un poco de física y matemáticas podemos entender la esencia del

vuelo propulsado y, sin ser especialistas, pudimos mostrar la viabilidad de un vehículo volador de propulsión humana y establecer sus características principales.

Referencias

1. Ciclo de contracción muscular. <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/1/10/Muskelmolekulartranslation.png>
2. Video mostrando los cambios conformacionales que sufre la miosina durante la contracción muscular https://es.wikipedia.org/wiki/Miosina#mediaviewer/File:Miosin_conformational_change.gif
3. Página de la wikipedia sobre contracción muscular https://en.wikipedia.org/wiki/Muscle_contraction
4. Página sobre el premio Sikorsky, https://en.wikipedia.org/wiki/Igor_I._Sikorsky_Human_Powered_Helicopter_Competition
5. Página del equipo *AeroVelo* <http://www.aerovelo.com/>
6. Video del vuelo con el que el *AeroVelo Atlas* se hizo acreedor al premio Sikorsky <https://www.youtube.com/watch?v=LEPryYsN1wY>

Para actividades recientes de la Academia y artículos anteriores puede consultar: www.acmor.org.mx

ímpetu Mgt proporcionado por la gravedad. Podemos calcular la masa m como la densidad ρ del aire multiplicada por el volumen V de aire impulsado por el rotor. Podemos estimar este volumen como aquel de un cilindro cuya tapa es el área que barre la hélice A y cuya altura es la distancia $z=vt$ que recorre el aire. Podemos juntar los resultados previos en una sola ecuación $Mg t=\rho Av^2 t$ de donde afortunadamente podemos eliminar el tiempo arbitrario t y despejar la velocidad resultante del aire $v=\sqrt{(Mg/\rho A)}$. Por otro lado, sabemos que todo cuerpo que se mueve tiene *energía cinética* proporcional a su masa y al cuadrado de su velocidad. En particular, la energía que debemos dar a una masa de aire m para que se mueva a una velocidad v es $E=1/2 m v^2$ y sustituyendo las expresiones anteriores, $E=1/2 \rho A v^3 t=1/2 (Mg)^{3/2}/(\rho A)^{1/2} t$. Dividiendo entre el intervalo de tiempo obtenemos la potencia P requerida para mantener el helicóptero en el aire $P=E/t=1/2 (Mg)^{3/2}/(\rho A)^{1/2}$. Le sugiero al lector que intente reproducir las cuentas indicadas arriba para comprender el cálculo a cabalidad (y para identificar y corregir cualquier error que pudiera haber cometido yo en el camino).

Analizando el resultado obtenido arriba notamos que la potencia que requiere un helicóptero depende de cantidades fundamentales como la aceleración de la gravedad, de cantidades dadas como la densidad del aire y de parámetros de diseño como la masa de la nave y, en particular, por el área A barrida por su hélice.

Esta última depende del radio r de la hélice a través de $A=\pi r^2$ donde $\pi=3.14159...$ es la razón entre el perímetro de un círculo y su diámetro. El resultado interesante es que *la potencia requerida es inversamente proporcional al*



Vista aérea del cuadróptero.