

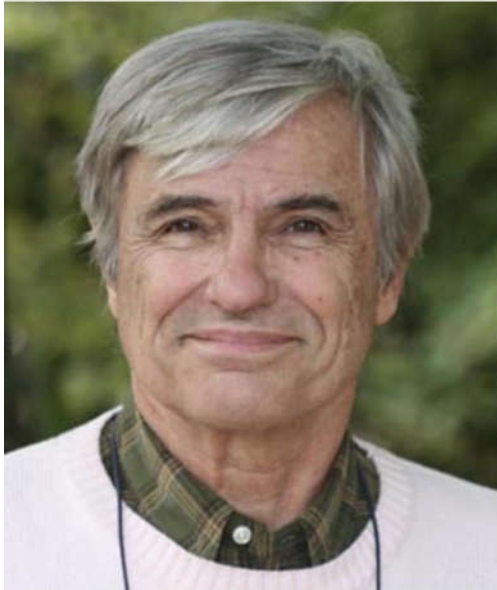
# PASIÓN VERTICAL

Jean-Pierre Petit



# Saber sin Fronteras

**Asociación sin ánimo de lucro creada en 2005 y administrada por dos científicos franceses. Su finalidad: difundir conocimientos científicos por medio de historietas en PDF descargables de manera gratuita. En 2020 hemos completado 565 traducciones en 40 lenguas. Y más de 500.000 descargas.**



**Jean-Pierre Petit**



**Gilles d'Agostini**

**La asociación es completamente voluntaria. El dinero donado es usado en su totalidad para retribuir a los traductores.**

**Para hacer una donación, use el botón de PayPal en la página de inicio:**

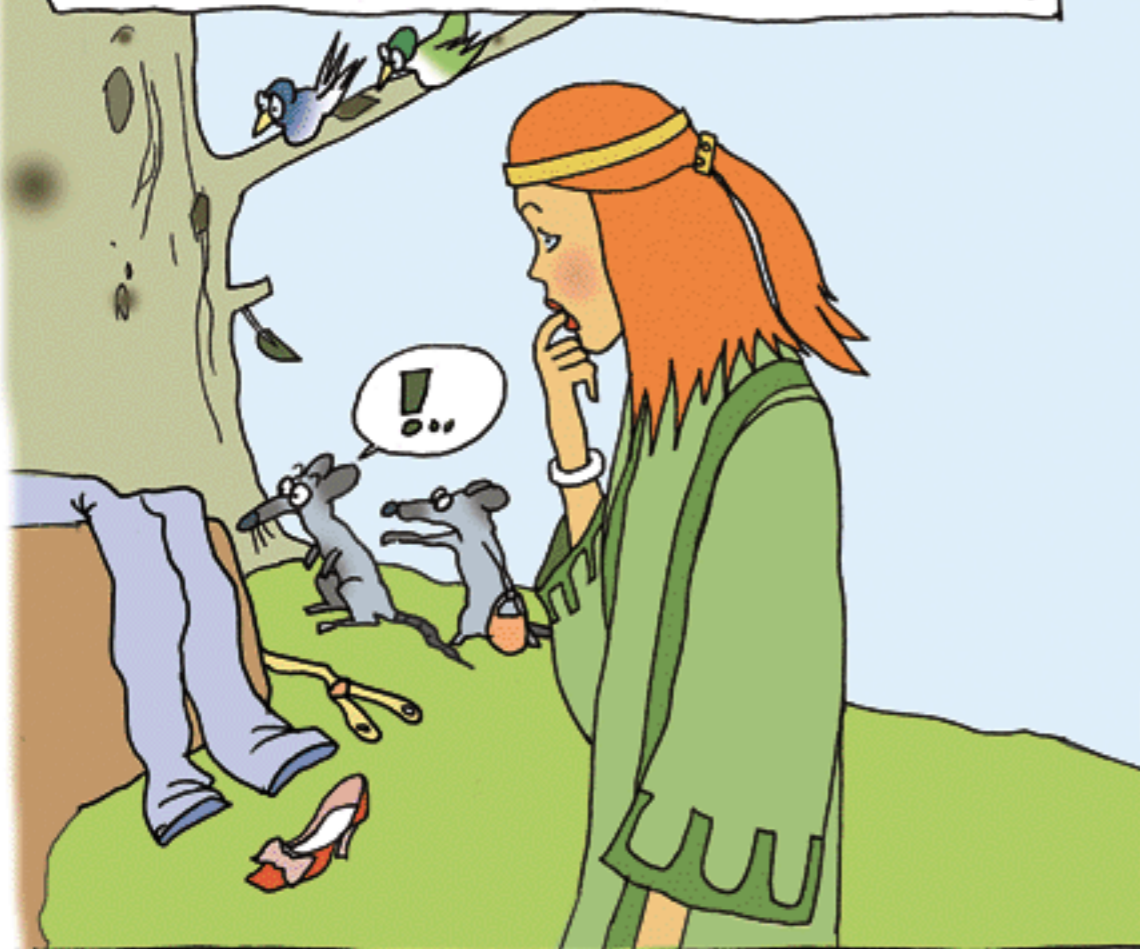
<http://www.savoir-sans-frontieres.com>



Había una vez en Westfalia un castillo que pertenecía al barón de Thundertentronckh. En él vivía con su esposa y su hija Cunegunda. Un joven mancebo llamado Cándido vivía también en el castillo. Era hijo de una pariente del barón y, al parecer, de uno de los ochenta cazadores del reino. Habitaba también el castillo un filósofo, el maestro Pangloss, gran admirador de los escritos de Leibniz, quien había probado admirablemente que no había efecto sin causa y que, en el mejor de los mundos posibles, el castillo del señor barón era el más bello de los castillos, y madam la baronesa la mejor de las baronesas posibles.



Cunegunda, de 17 años, paseándose un día por los alrededores del castillo, vió entre los matorrales al doctor Pangloss, que daba una lección de física experimental a la doncella de su madre. Como tenía gran disposición para las ciencias, Cunegunda observó sin pestañear las reiteradas experiencias de que era testigo (\*)



Vió con claridad la razón suficiente del doctor, los efectos y las causas, y regresó agitada, pensativa y deseosa de aprender (\*)



Encontró a Cándido de vuelta al castillo, y enrojeció. Cándido también enrojeció. Lo saludó Cunegunda con voz trémula, y contestó Cándido sin saber lo que decía (\*)



(\*) Reproducción fiel al texto de Voltaire (1694-1778), extraída de su obra "Cándido o el optimismo".



Cunegunda dejó caer su pañuelo, Cándido se agachó para recogerlo. Ella hizo lo mismo. Sus manos se tocaron, sus rodillas temblaron (\*)



Sus bocas se encontraron, sus manos se extraviaron. El barón, que pasaba por allí, vió la escena, sus efectos y sus causas



Y echó a Cándido del castillo a patadas en el trasero (\*)

Cunegunda se desmayó; cuando volvió en sí, la señora baronesa le dio de bofetadas y la encerró en una habitación en lo alto de la torre del castillo(\*)

y todo fue consternación en el más bello y agradable de los castillos posibles... (\*)

(\*) Reproducción de la obra de Voltaire (1694-1778) "Cándido o el optimismo".



Vaya, pero si es nuestro enamorado despachado por su futuro suegro

Ah, maestro Pangloss, me he convertido en el más desdichado de los hombres. El barón tiene a su hija cautiva en el torreón, y su madre, para evitar que anude prendas para escapar, no le ha dejado más que una manta



Estamos dispuestos a huir pase lo que pase. Pero para poder rescatarla de esa funesta prisión, tendría que convertirme en ...¡un pájaro!

Tal vez yo pueda ayudarlos...



Tengo una máquina voladora: un aeroplano

¿Qué distancia necesita para aterrizar?

Unos ciento cincuenta metros



¡Eso no va a funcionar!  
¡La terraza que está en lo alto de la torre donde está encerrada Cunegunda es demasiado estrecha!

Para saber cómo vuela un aeroplano pueden leer "¿Y si voláramos?!", en <http://www.savoir-sans-frontieres.com>

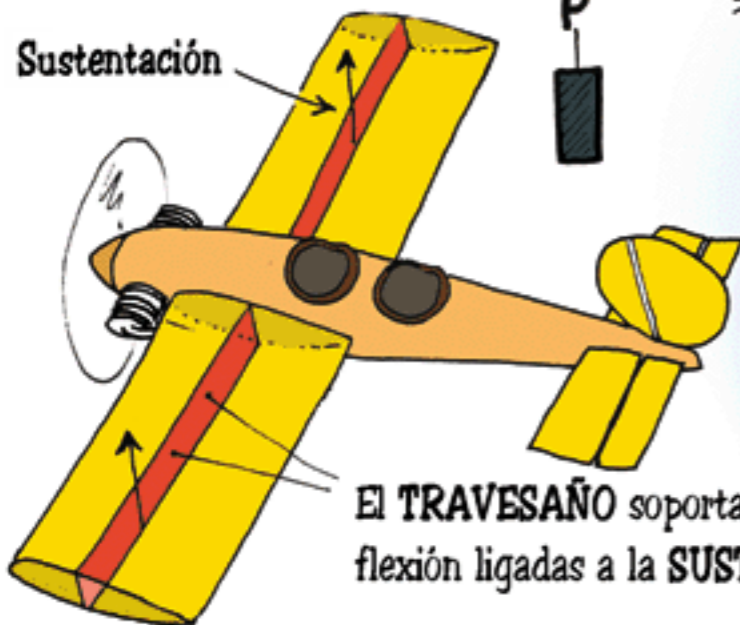
Podría intentar reducir la longitud de aterrizaje realizando una aproximación a menor velocidad. Como la **SUSTENTACIÓN** del ala es proporcional a su **INCIDENCIA  $\alpha$** , inclinando el avión debería poder volar más lentamente



Como en las puntas de las grúas



Estas barras trabajan por **TRACCIÓN**



El **TRAVESAÑO** soporta las fuerzas de flexión ligadas a la **SUSTENTACIÓN**

Entonces es esta ala la que le permite mantenerse en el aire

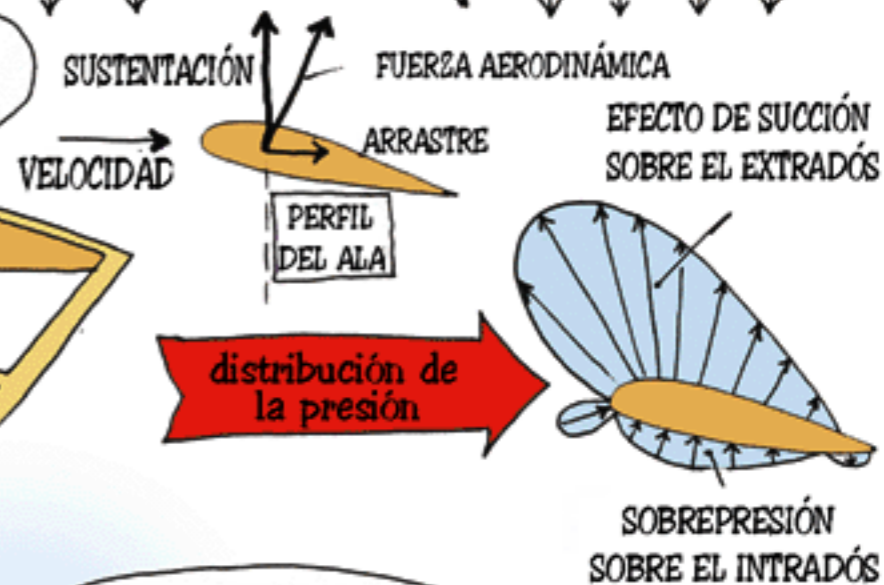


Si

VIENTO RELATIVO

Frente de ataque

He colocado cables tensores que transmiten las fuerzas de arrastre y evitan que las alas se replieguen hacia atrás



**KRAK!**



Sin estos preciosos tensores, caballeros, las alas se romperían

Una sabia precaución

Bueno, vamos a ver cómo podemos reducir la velocidad inclinando el aparato

Ahora tiro de la palanca

**KRAAAK!**

¡De repente las alas se rompen, doblándose hacia adelante!

Listo, arreglado. Basta con poner una segunda serie de tensores que impida que las alas se replieguen hacia adelante

Ahora el aparato está adecuadamente reforzado. Voy a inclinarlo poco a poco

Más vale que funcione, o si no que alguien me lo explique...





# LA PÉRDIDA DE SUSTENTACIÓN

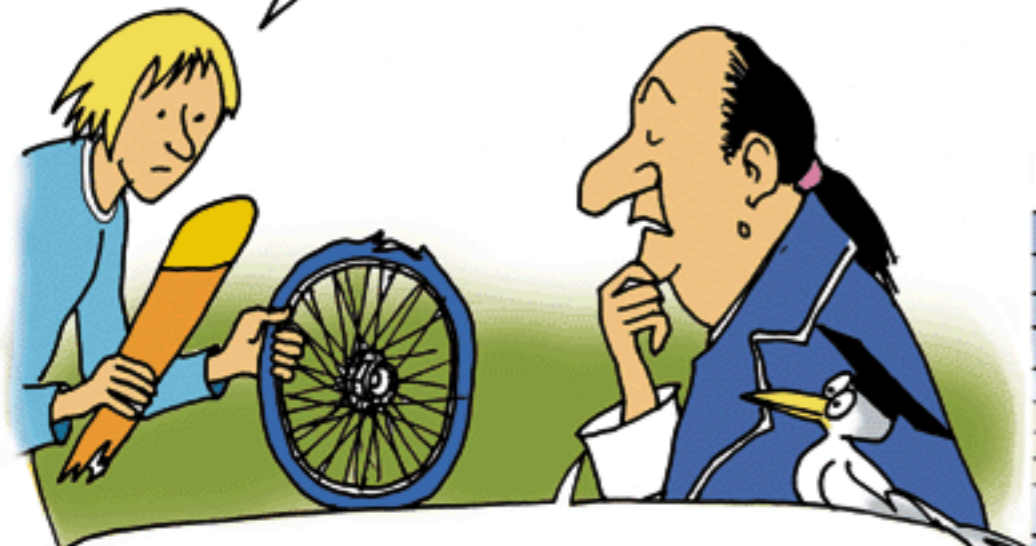


¡Tuvo usted en verdad suerte esta vez de haber caído justo encima de este montículo de heno!

¿Qué fue lo que pasó?

No lo sé. A una cierta incidencia, ¡la sustentación desapareció!?!

No será con esta máquina que pueda liberar a Cunegunda. Francamente me pregunto si esta cosa tiene algún futuro



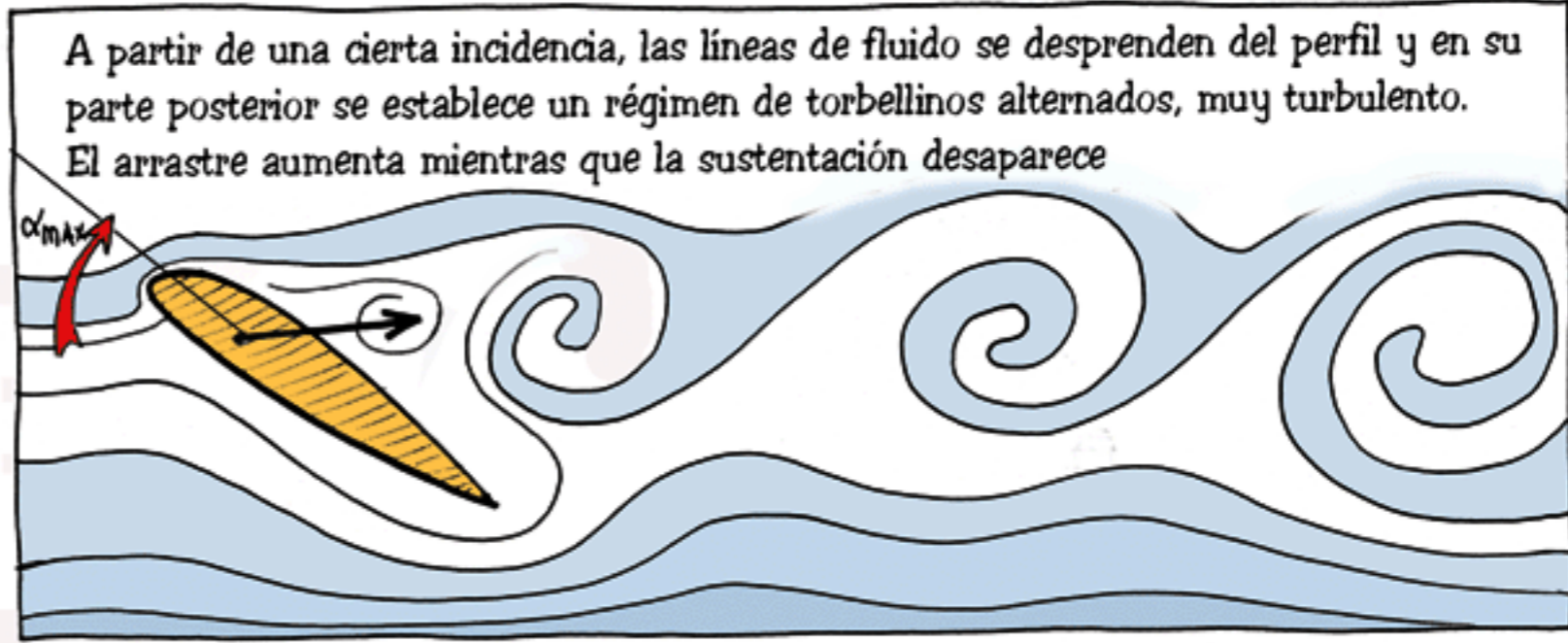
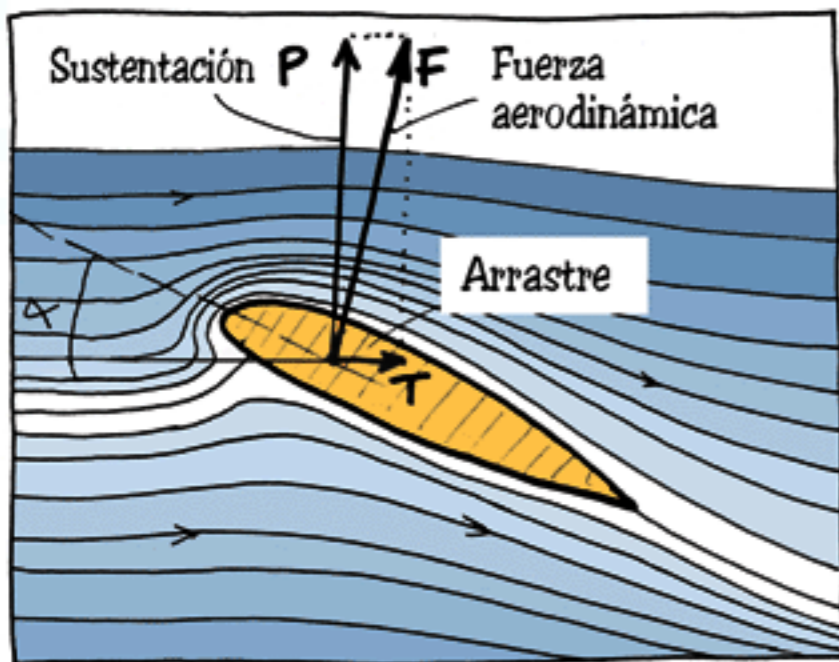
Puesto que no hay efecto posible sin causa, tenemos que descubrir la razón suficiente de esta brutal desaparición de la sustentación



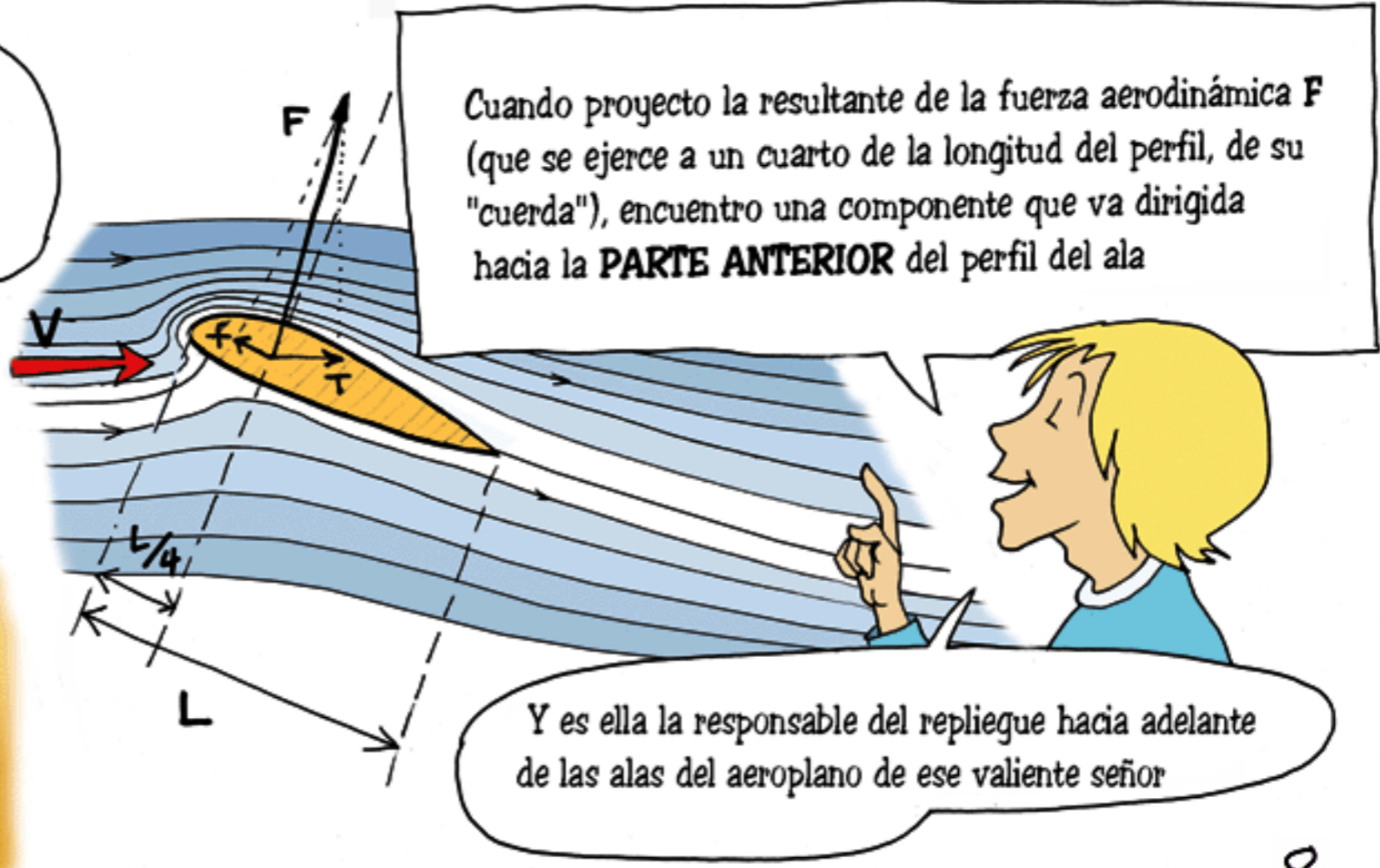
No hay ninguna mención de este fenómeno en "¿Y si voláramos?" (\*). Aquí vemos solamente que la sustentación se produce cuando un flujo bien regulado envía el fluido hacia abajo



No hay más que hacer sino aumentar la incidencia



Quando observo el esquema del flujo que corresponde a una fuerte incidencia, noto inmediatamente algo



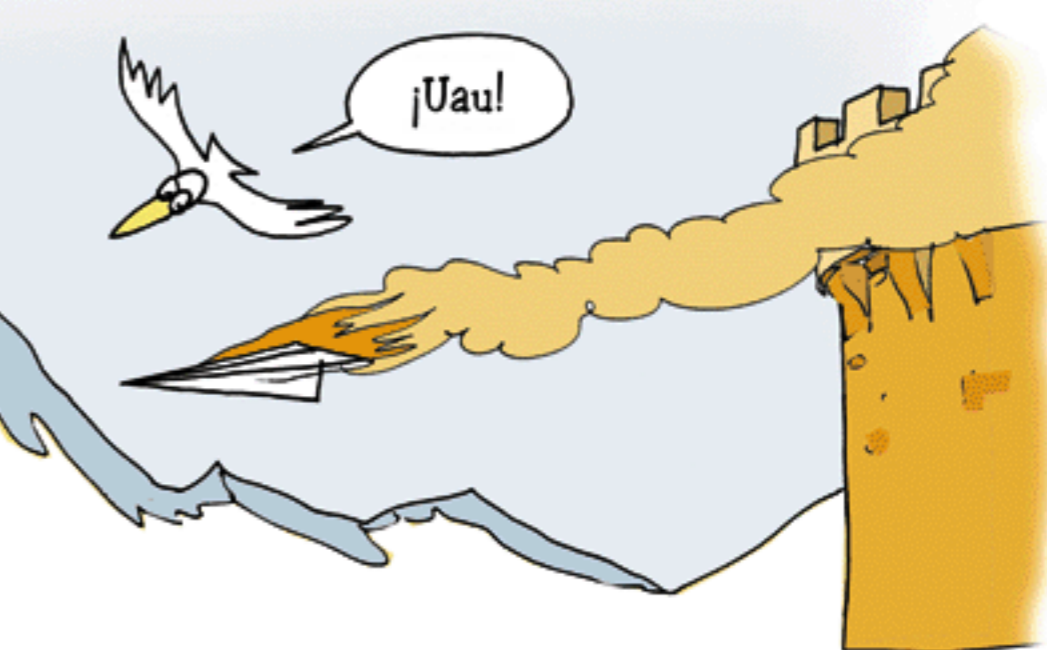
Quando proyecto la resultante de la fuerza aerodinámica  $F$  (que se ejerce a un cuarto de la longitud del perfil, de su "cuerda"), encuentro una componente que va dirigida hacia la **PARTE ANTERIOR** del perfil del ala

Y es ella la responsable del repliegue hacia adelante de las alas del aeroplano de ese valiente señor

Durante todo este tiempo, Cunegunda no hacía más que escribir cartas y cartas a Cándido



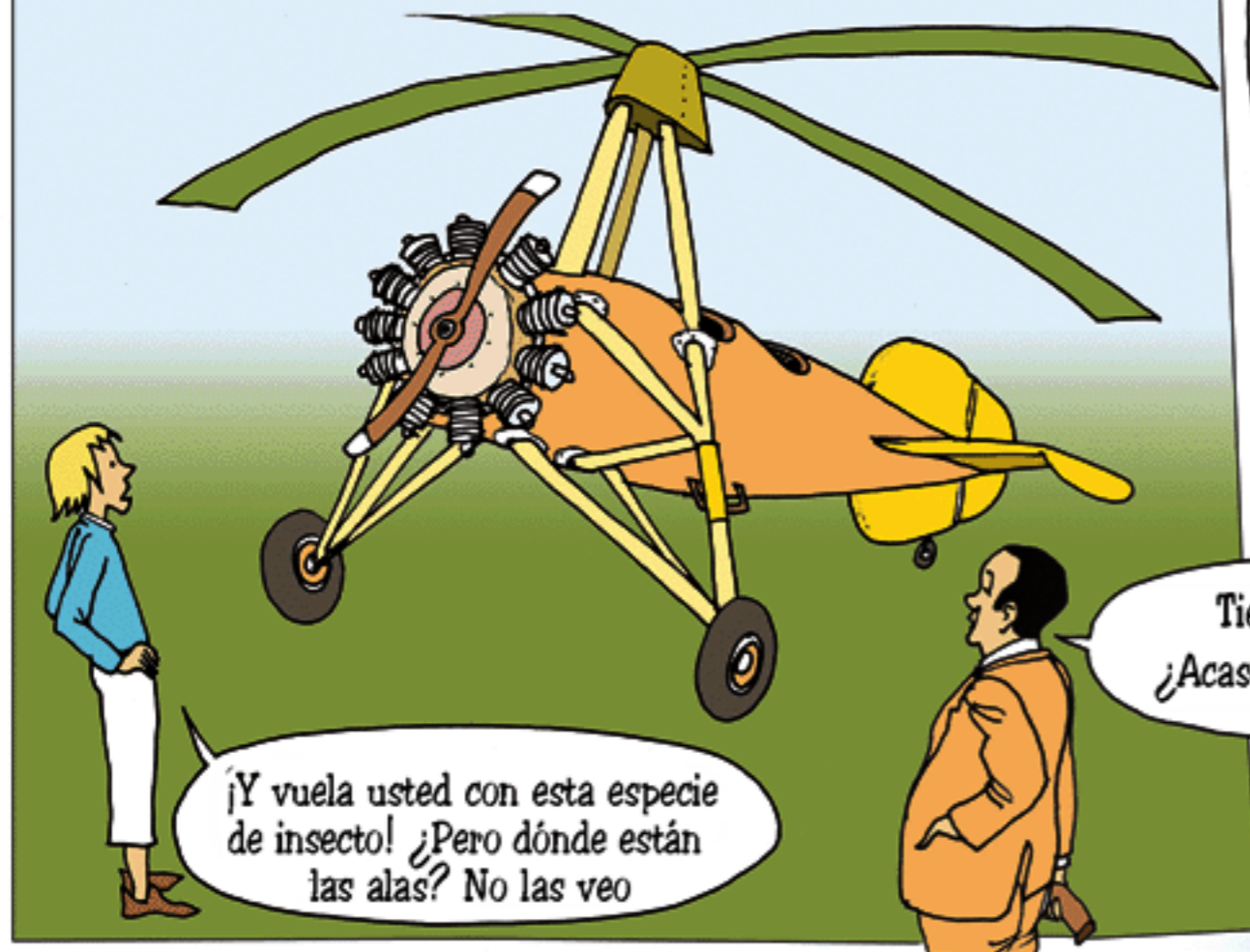
Pero sus palabras iban tan inflamadas de pasión que las misivas se consumían antes de tocar tierra



¿Un globo? No creo que funcione, y más bien podría arruinarlo todo



# EL AUTOGIRO



¡Y vuela usted con esta especie de insecto! ¿Pero dónde están las alas? No las veo

Tiene cuatro.  
¿Acaso no le bastan?



¿Cómo llama usted a este aparato?

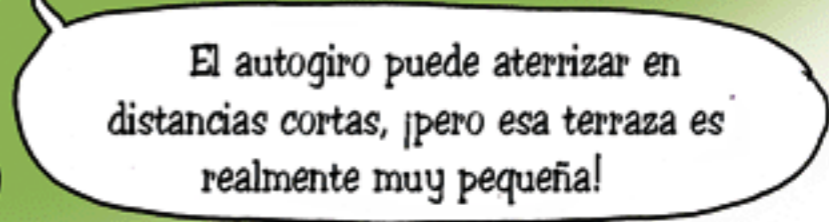
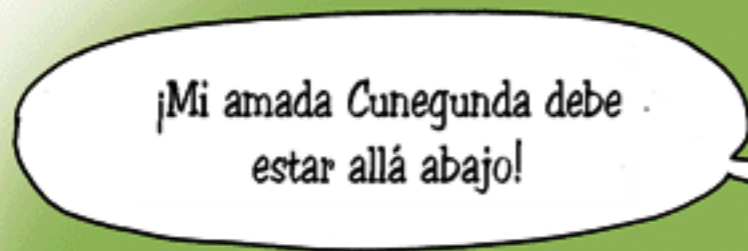
Autogiro.  
¿Quiere probarlo?


Quiere decir que soy yo quien va a garantizar nuestra sustentación... ¿con la mano?

¿Podría usted poner el rotor en movimiento?

El... eeh...  
¿cómo?


No...



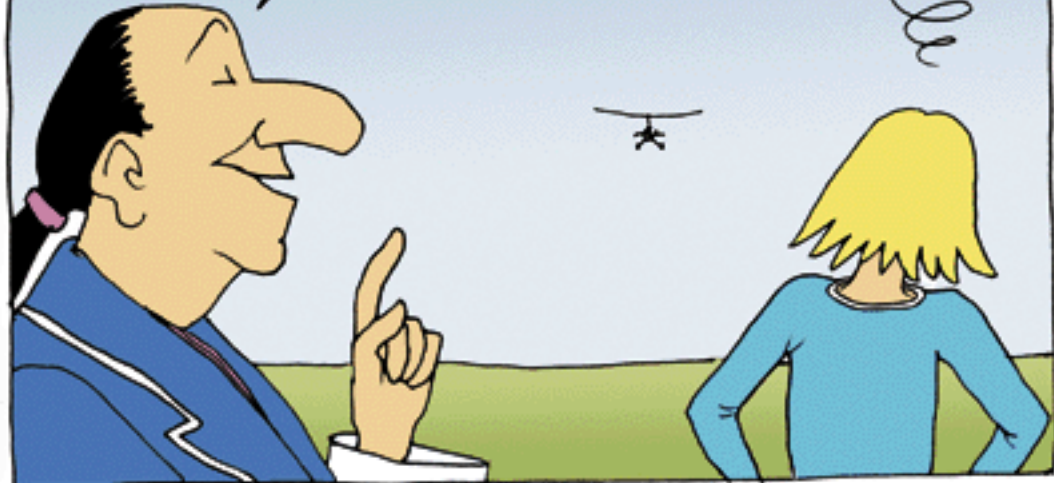


Ah, maestro Pangloss, he sobrevolado el castillo y la torre donde se encuentra prisionera Cunegunda. Y lo hice a bordo de la fantástica máquina voladora del señor de la Cierva

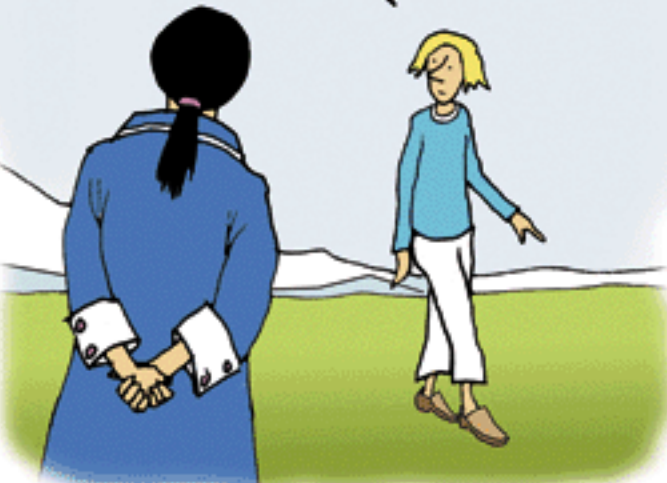
¿Te refieres al que está despegando allá a lo lejos?



¡Maldición! Se lleva consigo todos sus secretos. ¿Cuál es la fuerza misteriosa que hace girar su rotor?



La explicación es muy simple: un rotor está hecho para girar. Por lo tanto, está dotado de una virtud giratoria y gira. No hay efecto posible sin causa

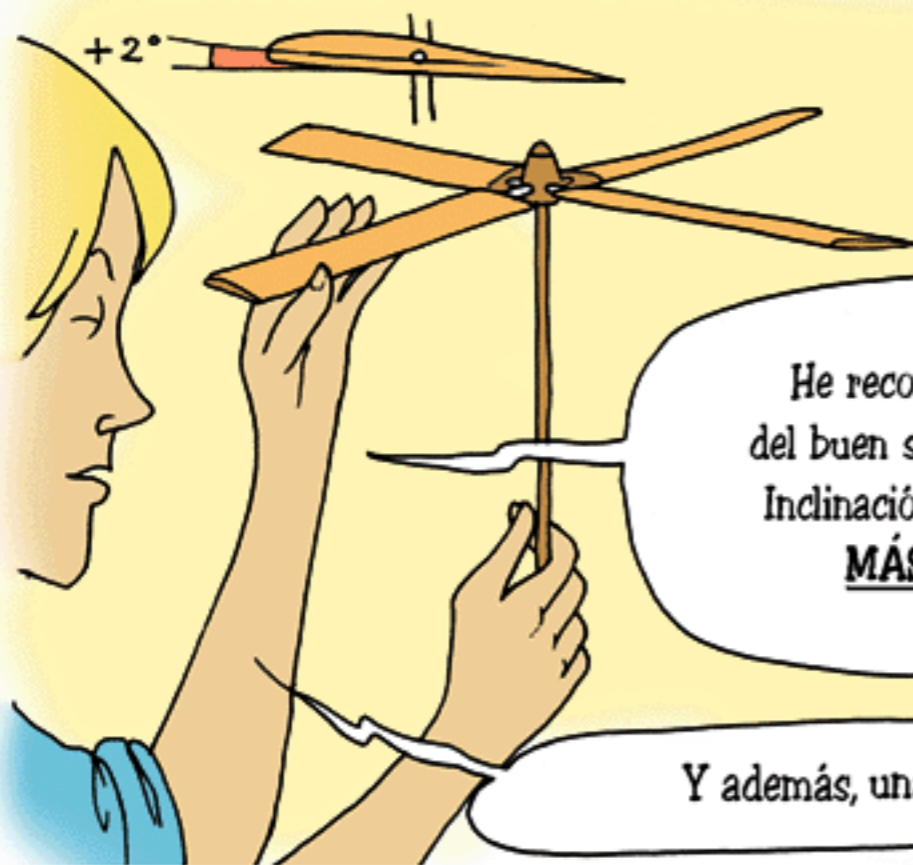


Vuestro razonamiento es impecable, maestro, pero me gustaría saber un poco más...



¿Qué hace Cándido?

Creo que va a reconstruir la maquinaria con la que el señor de la Cierva descubrió la razón suficiente del asombroso fenómeno



He reconstruido el rotor del buen señor de la Cierva. Inclinación de las palas = **MÁS** dos grados

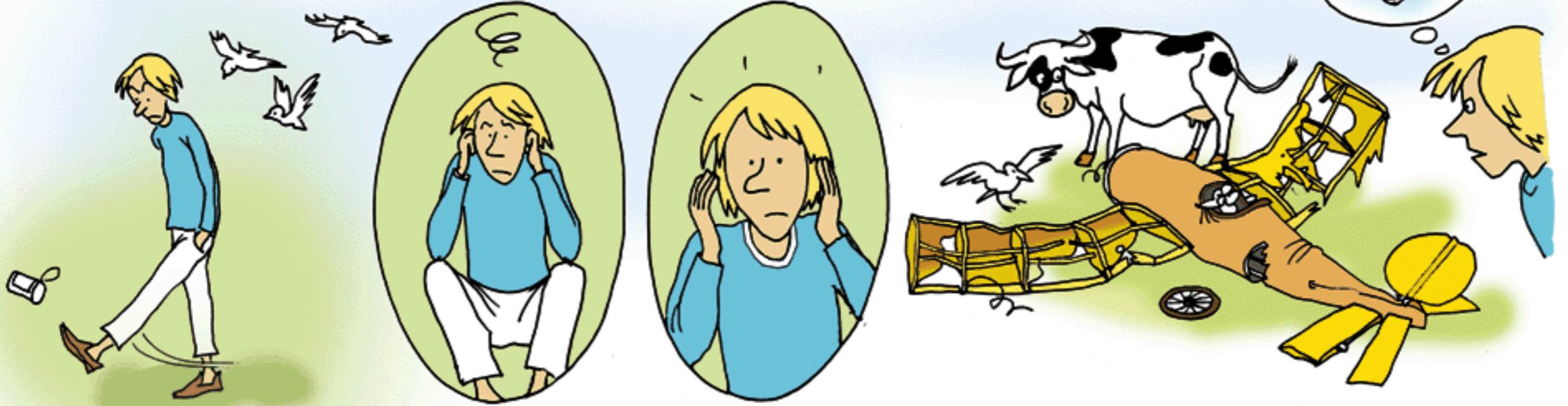


¡La pala queda muy bien fija, **CON ÁNGULO POSITIVO** en relación al flujo de aire!

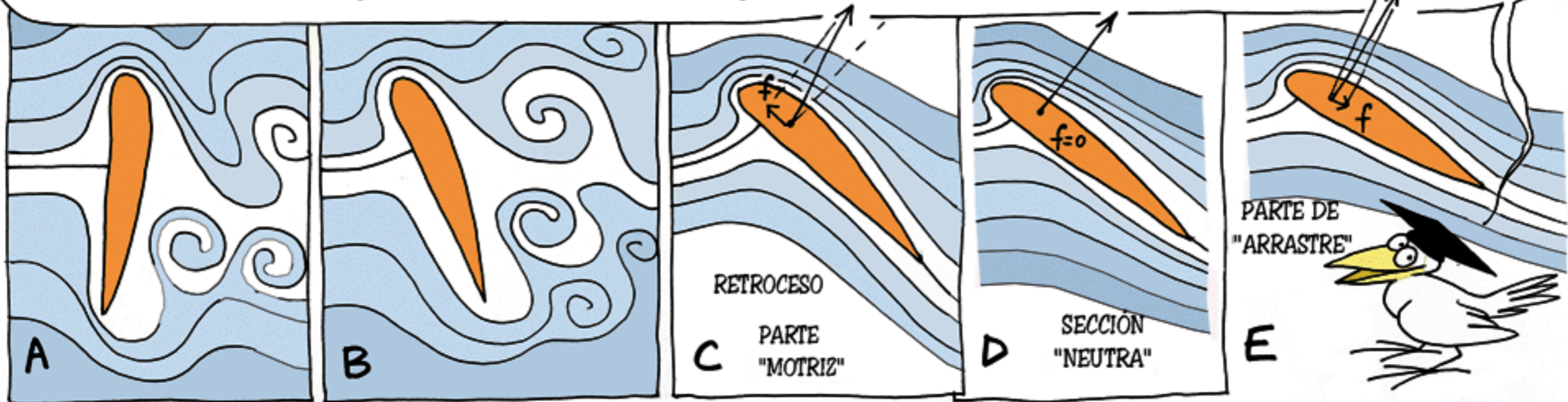
Y además, una estructura vertical, una rejilla de protección y un emisor de humo



# AUTORROTACIÓN



Cuando la incidencia de la pala disminuye en relación a la dirección del **VIENTO RELATIVO**, el flujo retorna (figura C)  
La fuerza aerodinámica (componente  $f$ ) tiende a arrastrar la pala. En D esta fuerza se anula, y luego se invierte en E.  
Entonces la componente  $f$  frena el movimiento de la pala

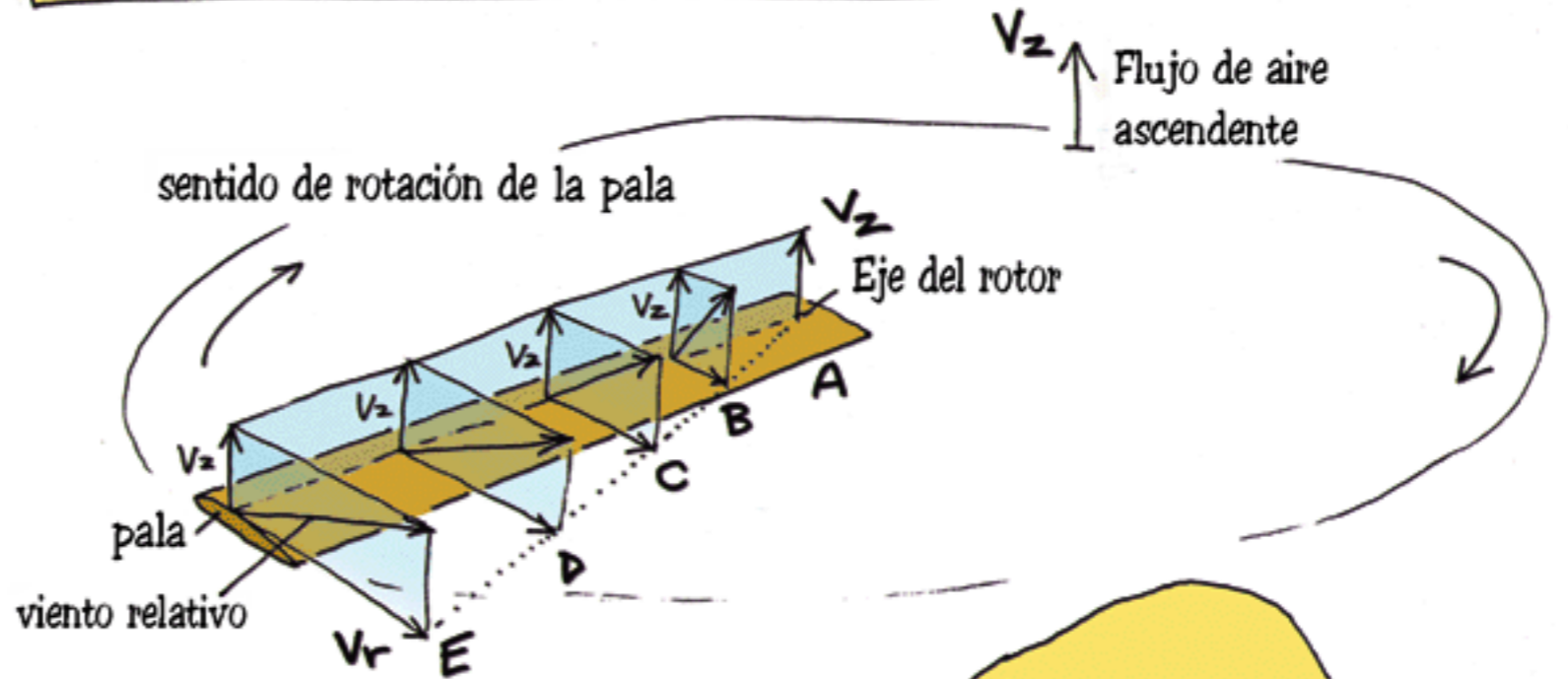
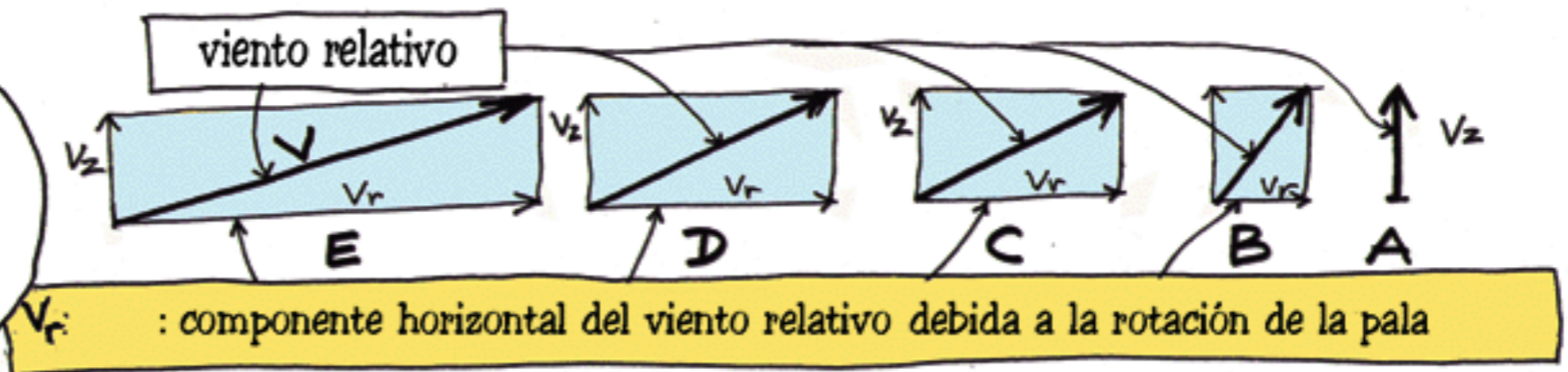




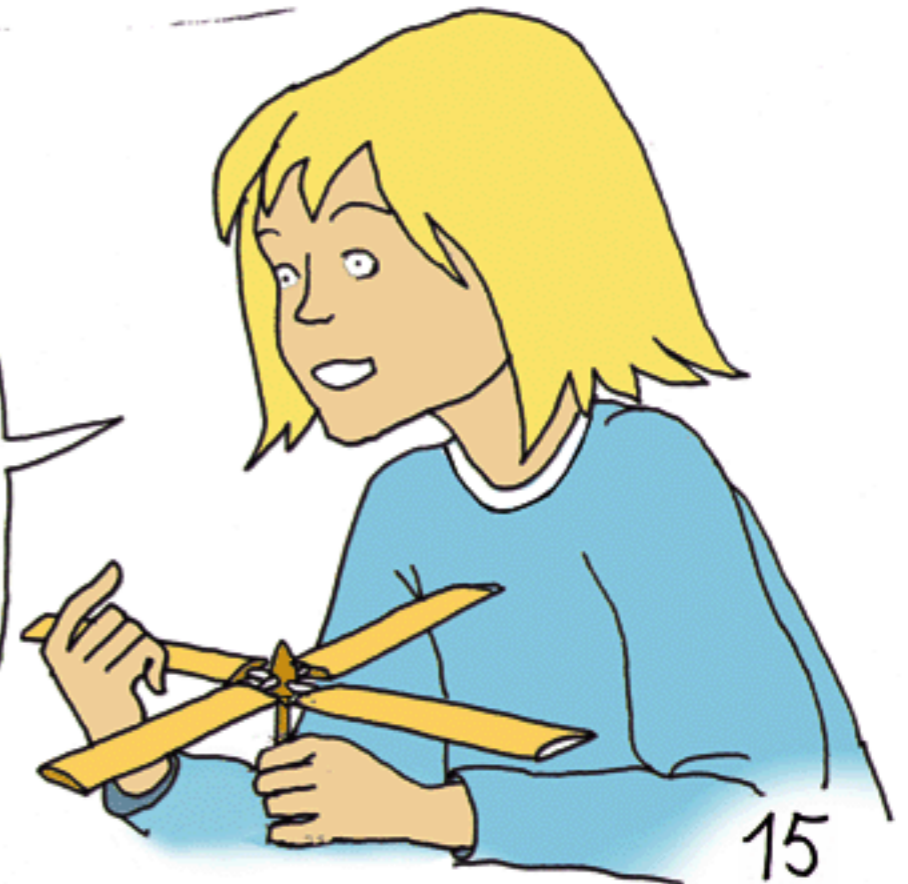
Entiendo, mi querido Cándido.  
 ¿Pero de dónde viene el cambio de dirección  
 de eso que llamas el **VIENTO RELATIVO**?



La velocidad del rotor  
 se combina con la  
 velocidad que resulta de  
 la rotación de la pala



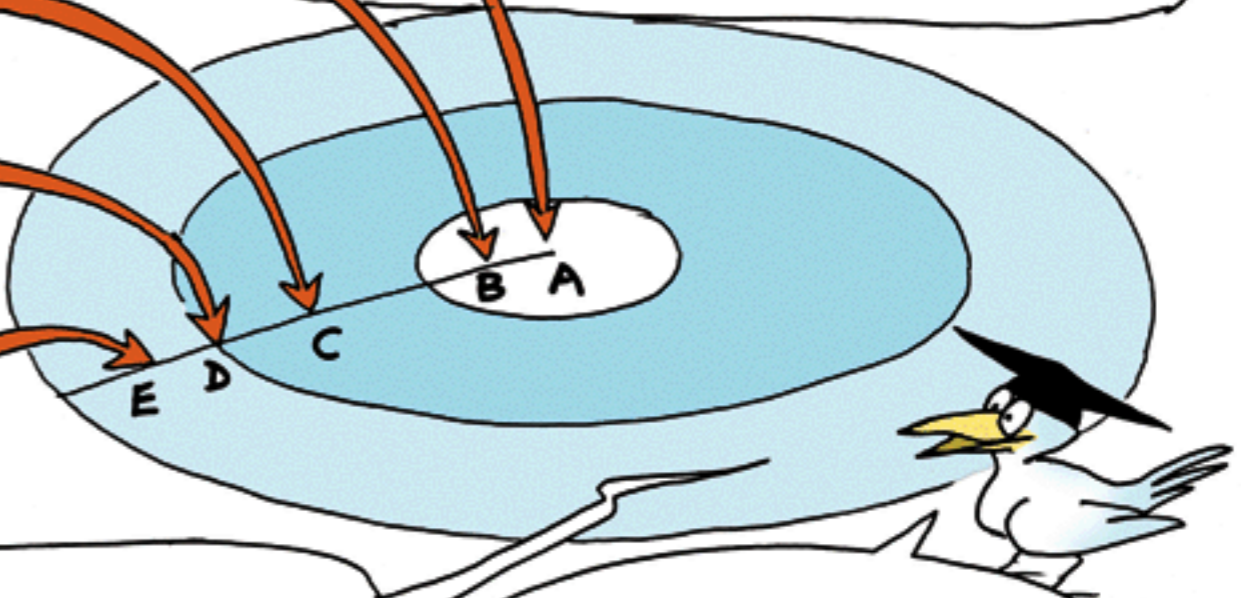
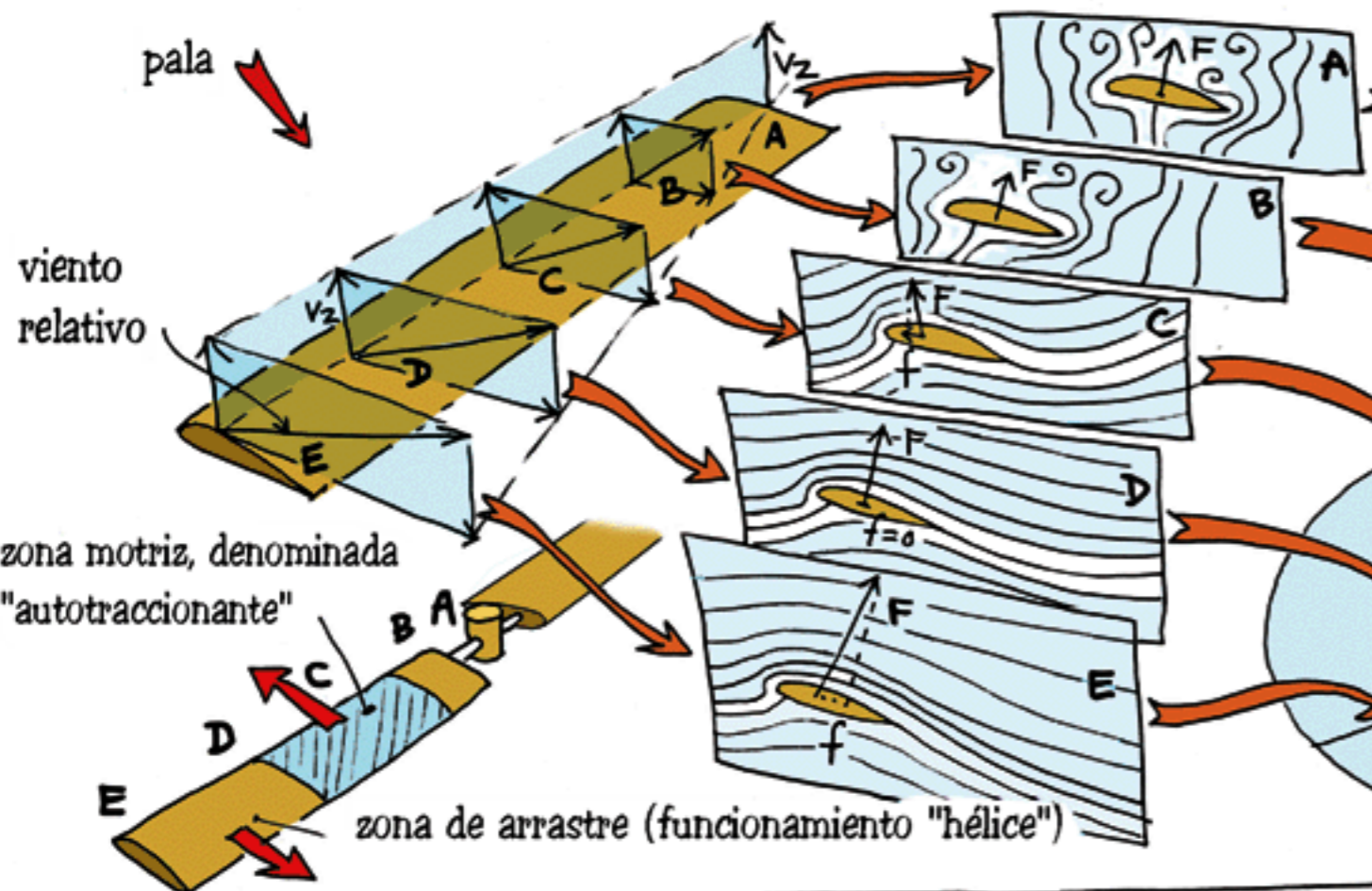
El rotor está inmerso en un flujo de aire ascendente que corresponde a una velocidad  $V_z$ . Esta se combina con la velocidad inducida por el movimiento de rotación de la pala,  $V_r$ , velocidad que es proporcional a la distancia al eje. La resultante es el **VIENTO RELATIVO**, que incide más y más sobre la pala a medida que nos alejamos del eje. Al mismo tiempo, el módulo de esta velocidad aumenta desde el eje hacia la periferia



Según la forma en que este **VIENTO RELATIVO** incide en la pala, se obtienen flujos muy diferentes. Para visualizarlos, he adaptado un tubo delgado que emite humo, solidario con la pala de rotación. Y miren los resultados que he obtenido

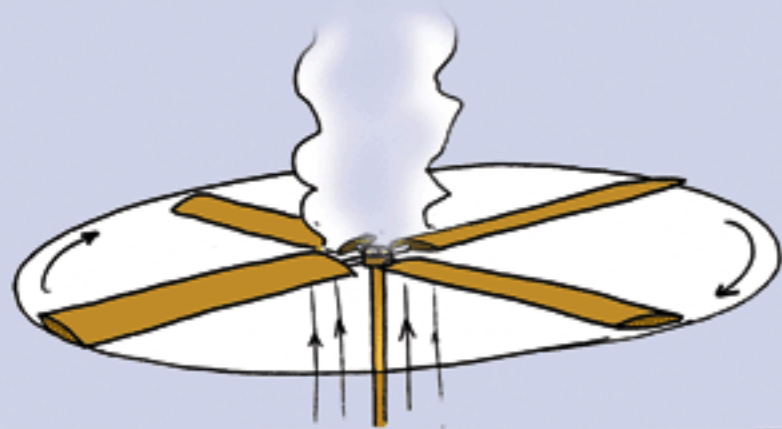


En **A** y en **B** el flujo se "pierde". La pala crea una fuerte turbulencia. En **C** el flujo retorna ante el perfil. La fuerza aerodinámica tiende a arrastrar la pala hacia adelante (zona motriz, "autorrotatoria", gris)

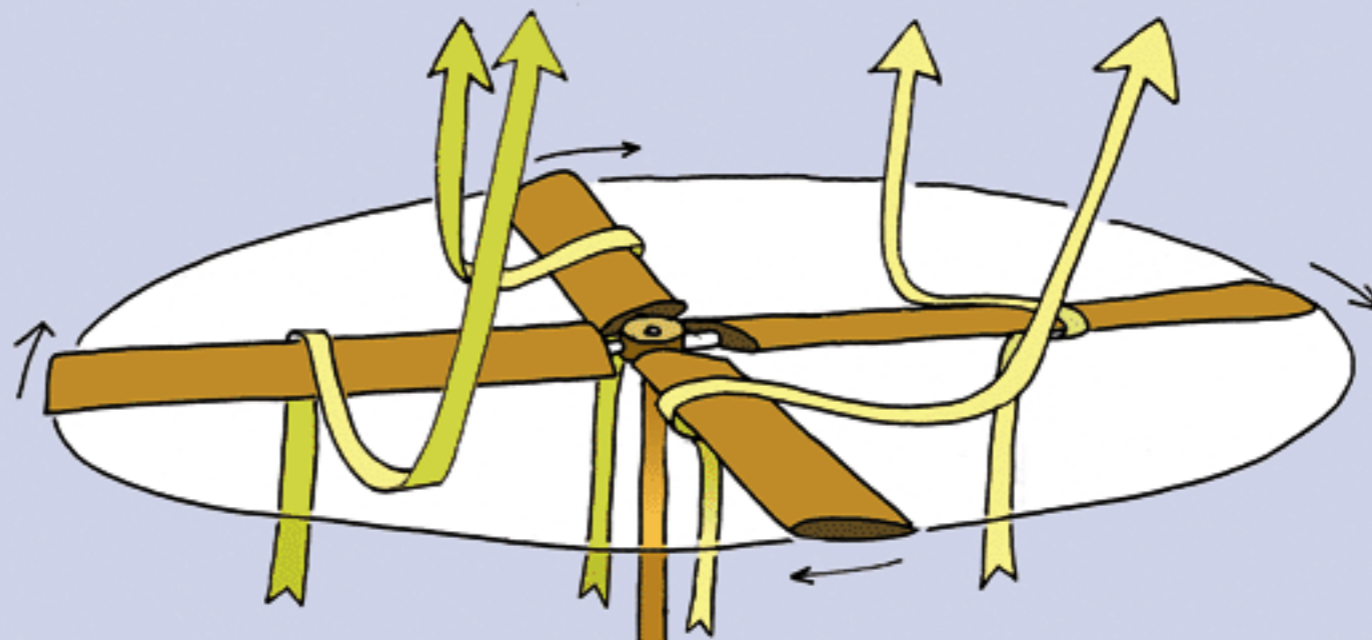


En **E**, la fuerza aerodinámica, también dirigida hacia arriba, tiende a frenar el movimiento de la pala. La figura **D** representa la situación límite, cuando  $f=0$ . En este régimen de **AUTORROTACIÓN** la porción sombreada de la pala es motriz, mientras que su extremo "se hace arrastrar". Se establece así un régimen **AUTOESTABLE**

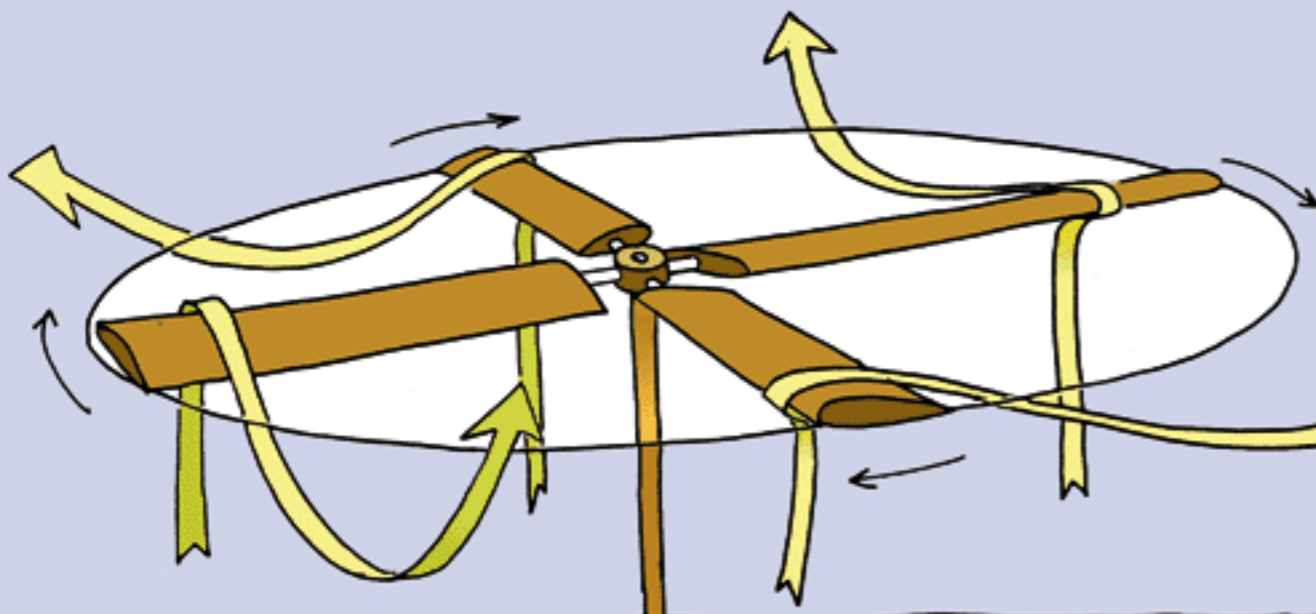
Todo eso es lo que ensayó Juan de la Cierva con su maquinaria



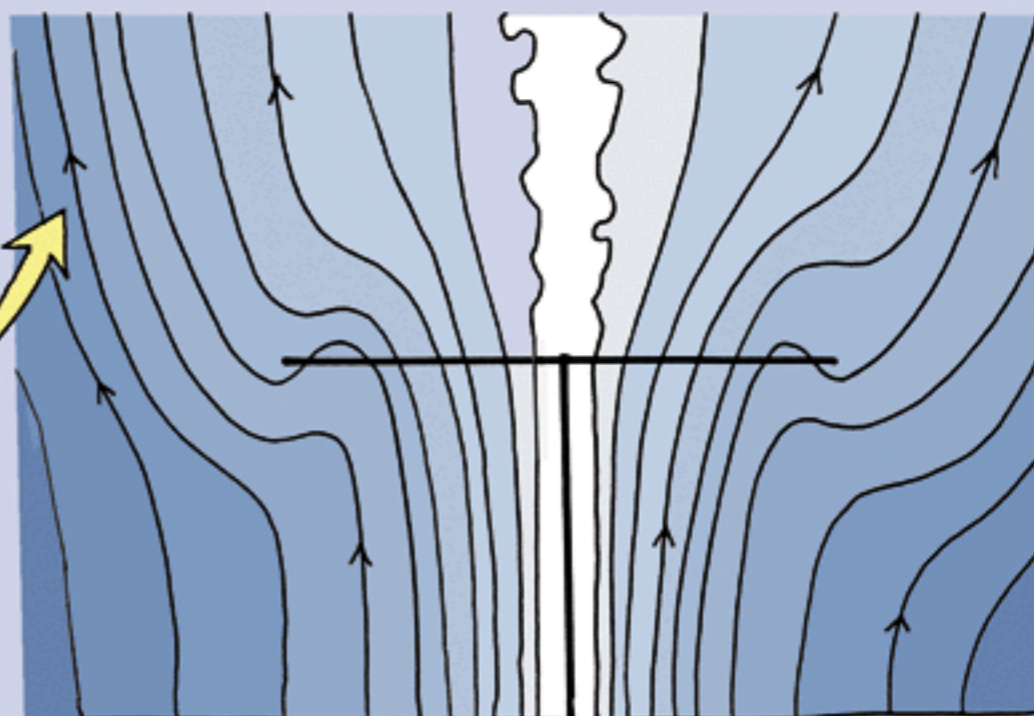
Por encima de la parte central  
el flujo se "pierde" y se forma  
una estela fuertemente turbulenta



Aquí, el flujo retorna en el perfil de las palas



En la periferia, el impulso comunicado a la masa de aire, dirigido  
hacia abajo (**VELOCIDAD INDUCIDA**) es suficiente para que  
este aire regrese por fuera del disco barrido por el rotor



Lo que confiere al flujo global  
la extraña apariencia que se observa aquí arriba

Mira, maestro Pangloss, lanzo esta pequeña maqueta desde aquí arriba después de comunicarle un impulso mínimo



lastre

Mínimo... ¿con respecto a qué?

Para conseguir que la parte periférica del rotor gire lo suficientemente rápido para que el flujo "retorne". Entonces se convierte en motriz y la rotación se acelera

zona turbulenta (el flujo se "pierde")



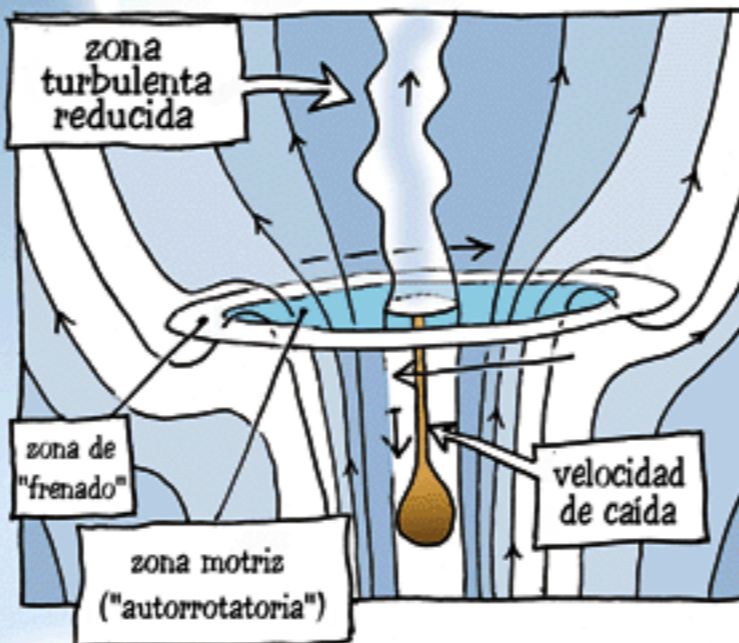
La porción periférica de las palas se vuelve motriz

zona turbulenta reducida

zona de "frenado"

zona motriz ("autorrotatoria")

velocidad de caída



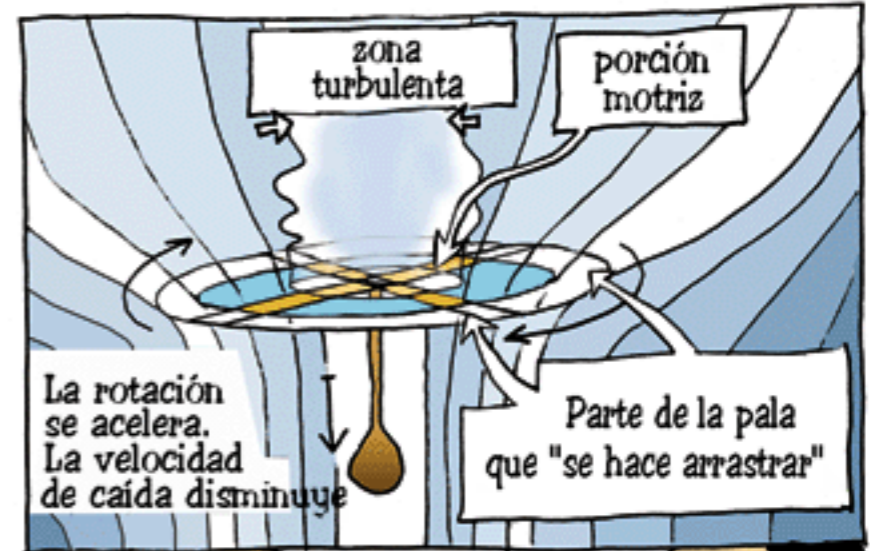
La zona de flujo turbulento (por "arrastre") se reduce a medida que la rotación se vuelve más y más rápida. Aparece entonces en el extremo de la pala una zona "de arrastre"

zona turbulenta

porción motriz

La rotación se acelera. La velocidad de caída disminuye

Parte de la pala que "se hace arrastrar"



La velocidad de rotación se estabiliza cuando los dos pares se equilibran. Entonces el régimen de autorrotación queda plenamente establecido y la velocidad de descenso es mínima

Obtendríamos un flujo similar si soltáramos un disco que no gira pero lleno de perforaciones cuyo diámetro decrece del centro hacia la periferia, lo cual crea zonas de diferente porosidad.

### La Dirección

agujeros grandes: paso de aire fuertemente turbulento

lastre

este disco no gira

zona "porosa"

sin agujeros: el fluido bordea el disco

¿Qué habría pasado si no le hubieras dado un impulso de rotación suficiente al comienzo?

La velocidad en el extremo de las palas no habría sido suficiente para que el flujo "retornara" sobre el perfil. Por lo tanto, no habría habido fuerza motriz, ni instauración de un régimen de autorrotación: ¡la maqueta habría caído como una piedra!

Por un instante llegué a pensar que este dispositivo le habría permitido a la señorita Cunegunda conseguir su evasión. Pero más bien creo que se habría roto todos los huesos

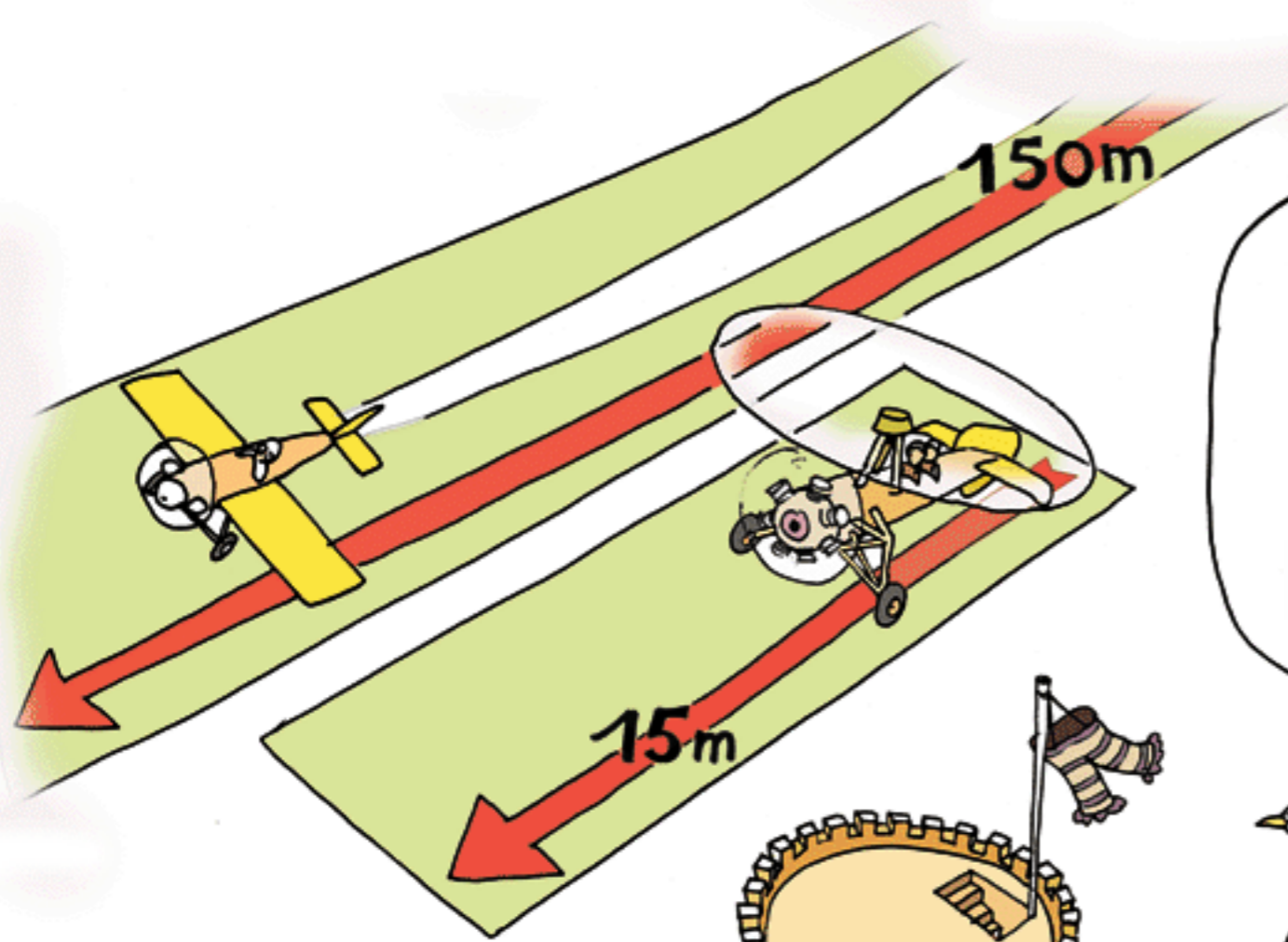
¿Y el autogiro?

Y sin embargo gira (\*)

Ahora que el misterio de la autorrotación de su rotor ha sido resuelto, sólo queda por añadir un poco de oblicuidad. El rotor se comporta como un disco con porosidad decreciente, del centro hacia la periferia

En resumen, el autogiro tiene un cierto parentesco con una cometa cuya tela tuviera una porosidad decreciente desde el centro hacia el borde, con un gran agujero en medio por el cual pasa aire turbulento.

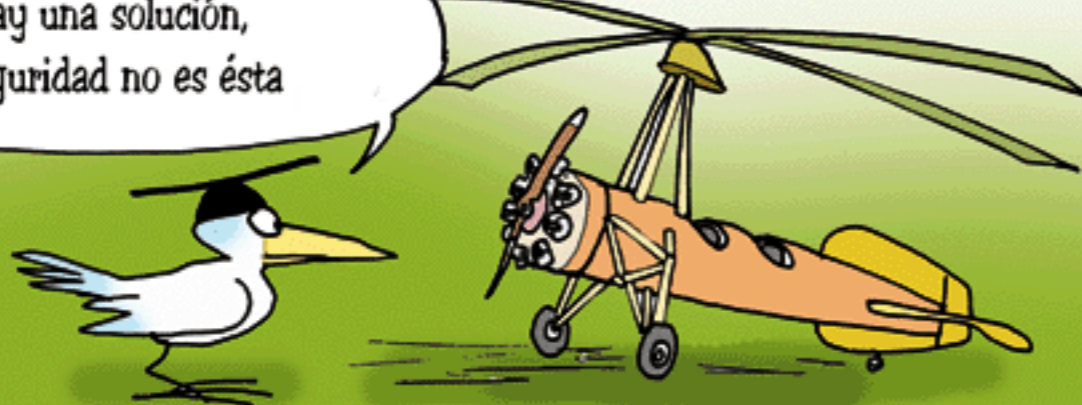
(\*) Eppur si muove (Galileo)



Resumamos: el aeroplano requiere de 150 metros para aterrizar. El autogiro se contenta con 15 metros. Pero la terraza de la torre es tan estrecha que, para poder aterrizar allí, haría falta en realidad un descenso vertical. ¿Qué máquina voladora puede realizar una proeza semejante?



Si hay una solución, con seguridad no es ésta





Ven rápido, algo está sucediendo en la torre

¡Quéé!  
¿Y ahora qué ocurre!?



Creo que Cunegunda está a punto de arruinarlo todo



¡Pon atención, que pisas mi vestido!



¡¿Para qué usas cosas tan largas?!

Querido mío, nada entiendes de la moda



¡QUIERO casarme con Cándido!

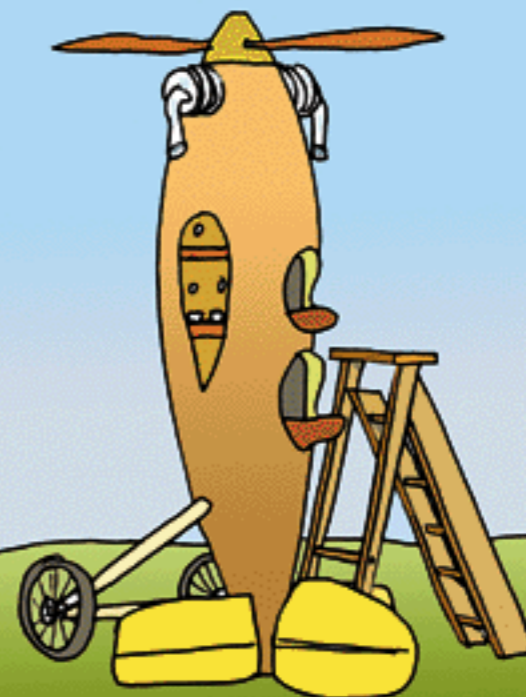




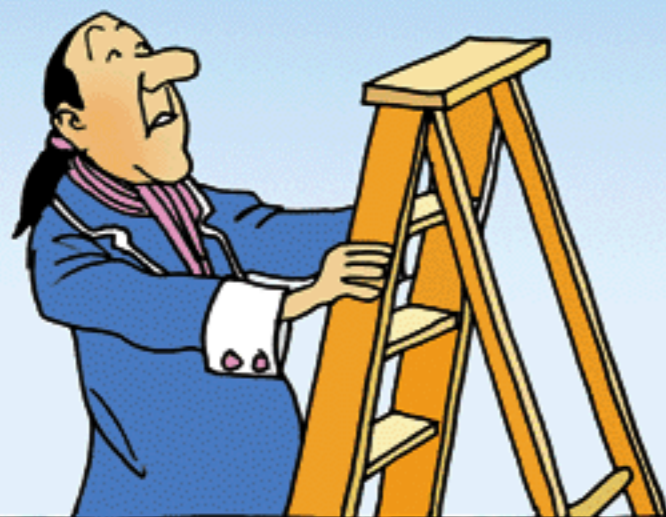
A fin de cuentas el piloto de aeroplano no estaba tan equivocado al querer inclinar su aparato. Lo mejor sería transformar su hélice de tracción en dispositivo de elevación. Y eso será decididamente mucho mejor que levantar las alas



Entonces, profesor, ¿qué me dices de esto?



Puedes retirar la escalera. Voy a poner los gases a fondo



WROOAR

¡NADA!?!



No te vayas a romper la cabeza. Te voy a alcanzar la escalera



¿Así que las alas también sirven para volar?!?

Hmm...

Vengan a ver



¿Qué es eso de la velocidad inducida?

Escucha lo que dice

¿Es cierto que vamos a quedar equipados con hélices?

Eee...

¿Volar?  
¡Absurdo!

¿Podremos dar marcha atrás con ese truco?



Si recorto las alas de un albatros, no podrá alzar vuelo. A la inversa, si alargo las alas de un pingüino...

¡Eeeh?!

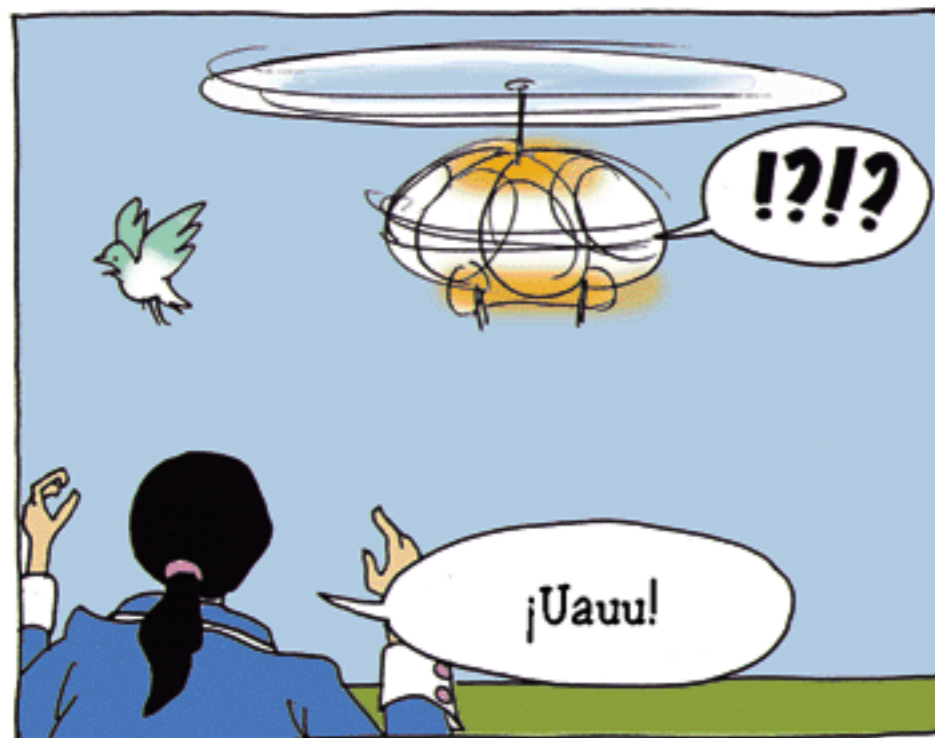
¡Suéltanme inmediatamente!



Tal vez mi "pingüino" tenga "alas" muy cortas. No puedo aumentar el régimen de mi motor indefinidamente para incrementar la velocidad de las palas de mi hélice. Ahora bien, la sustentación crece como el cuadrado de la velocidad. Solución: aumentar la superficie de sustentación, pero conservando la elongación: un albatros vuela mejor que una paloma. Voy entonces a alargar las palas de mi hélice, y a eso le llamaré un **ROTOR**

IAARRH!!

# EL PAR



(\*) Todo lo que sigue vale para 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8... palas.



Aquí tienen un helicóptero autoestable, dotado de dos rotores contrarrotatorios, siendo uno de ellos solidario con el fuselaje que gira



lámina de bristol libre de girar sobre su eje

rodamientos arandelas

hilo de acero, 5/10°

palo de balsa cuadrado 6x6

elástico

2 palos de balsa de sección cuadrada 3x3

perlas horadadas

4 listones en bristol

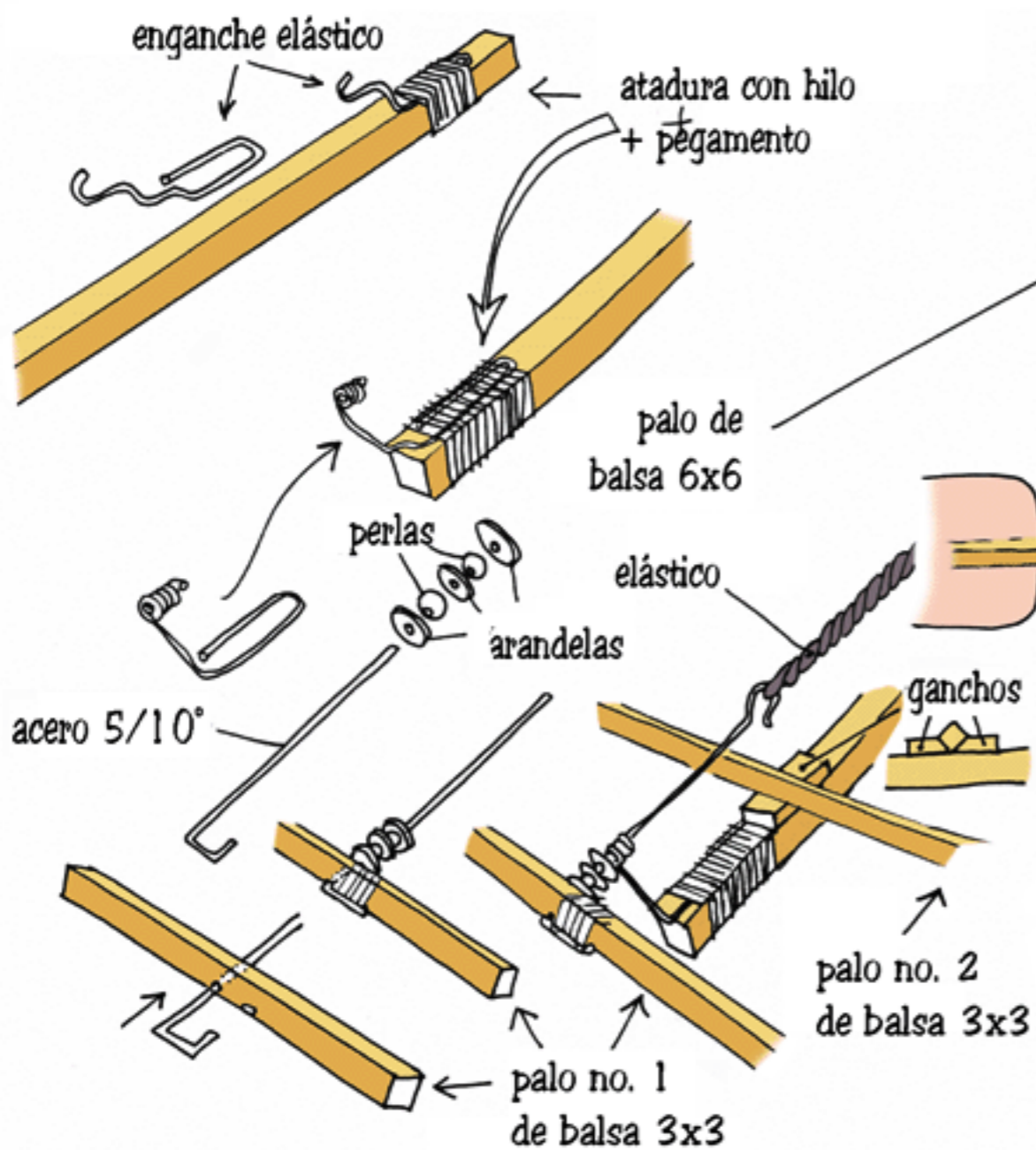
+ arandelas



pegamento



La parte delicada consiste en doblar el hilo de acero con la ayuda de DOS pinzas, de manera que se puedan fabricar los siguientes elementos:



elástico

listón en bristol unido a palo de balsa 3x3

listón en bristol unido a palo de balsa 3x3

los pasos de los listones están invertidos

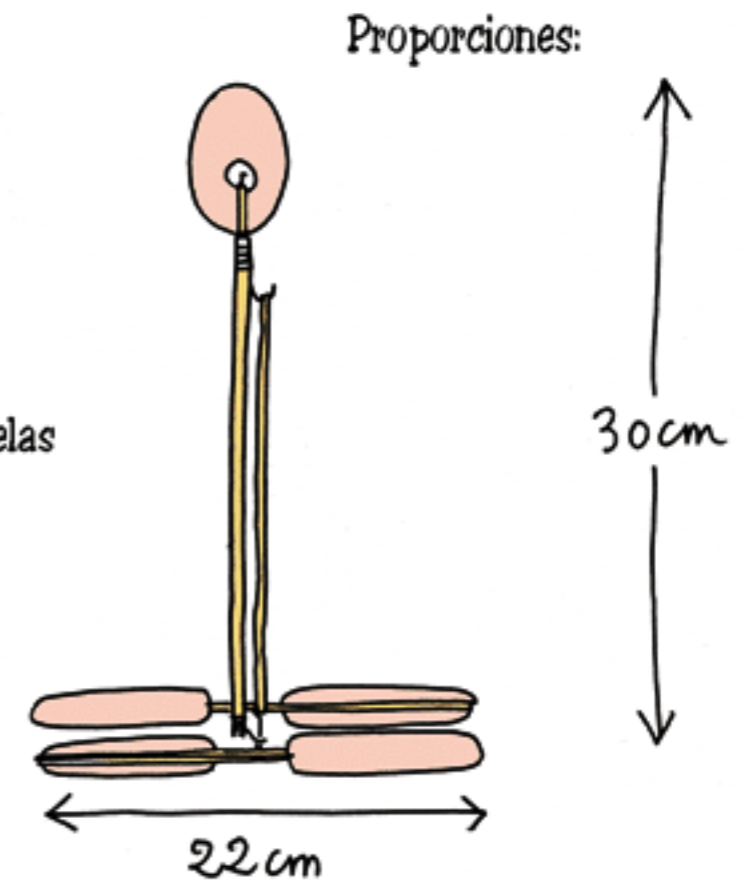
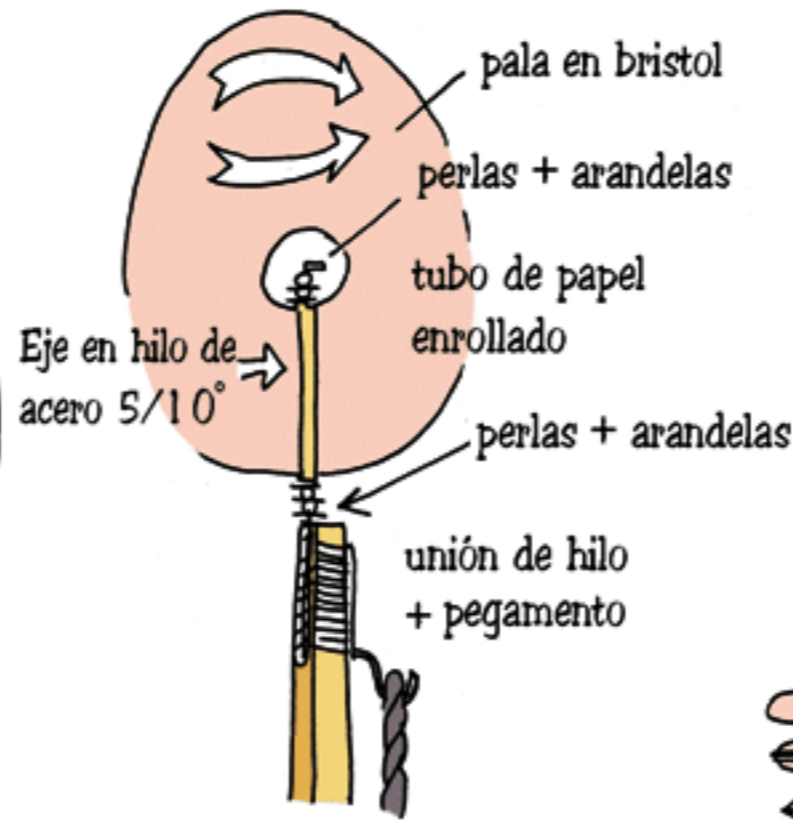
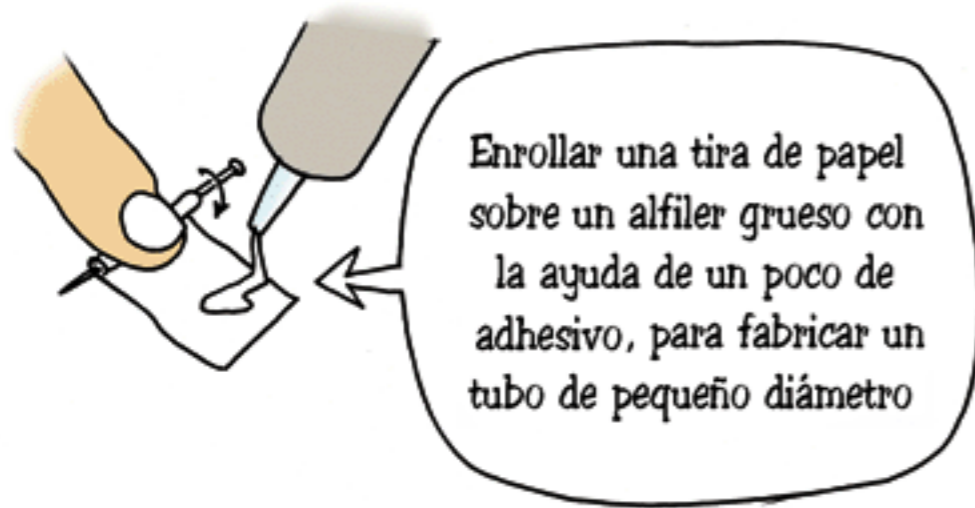
cala balsa

rotor no. 2

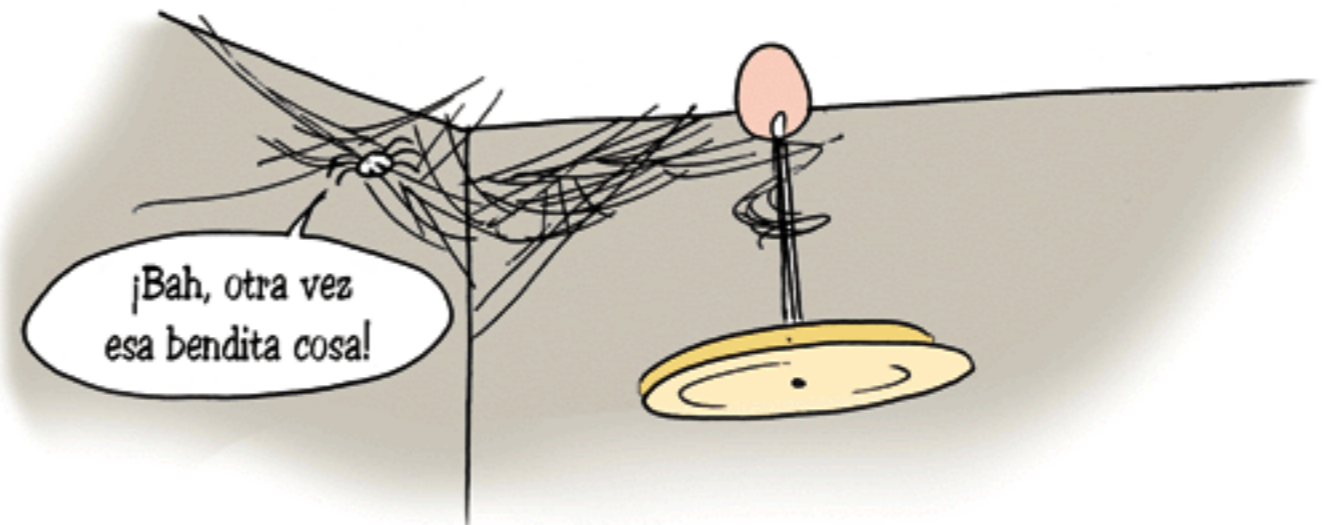
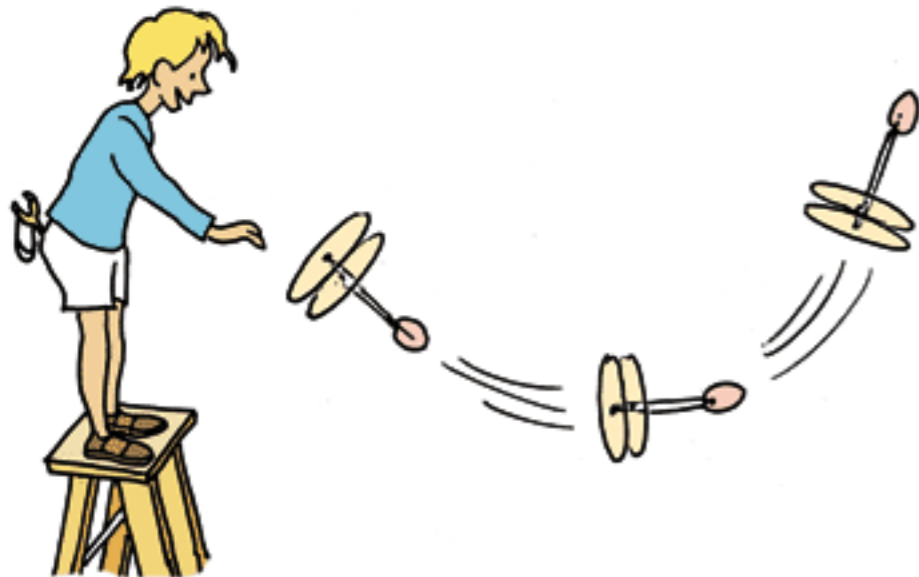
rotor no. 1

El elástico pone en movimiento el rotor inferior, el número 1. Debido al par, el rotor número 2, solidario con el palo de fuselaje, gira en sentido contrario

Montaje de la pala superior,  
que vuelve el artefacto autoestable



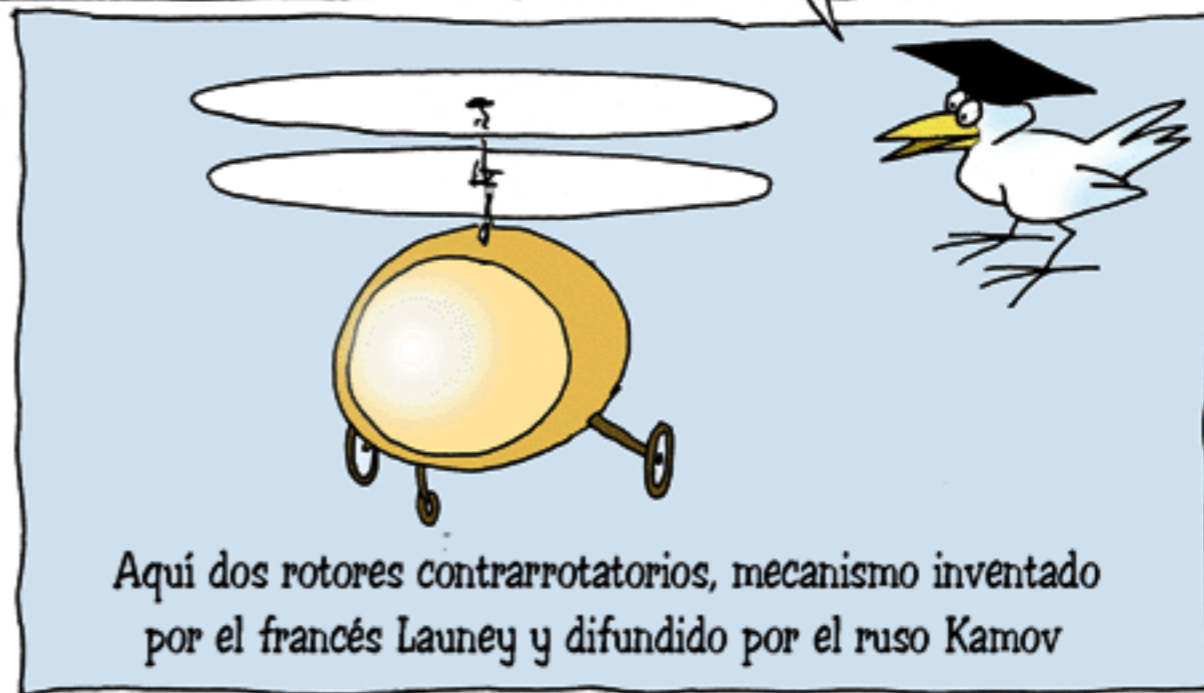
Cuando el helicóptero se inclina,  
parte de costado. El esfuerzo sobre la  
pala superior lo endereza. Liberado a  
sí mismo, asciende balanceándose (\*)



(\*) Cuando yo era niño utilizaba este artefacto para quitar las telarañas de lo alto de los techos del castillo de Thiers, en Sèvres (Francia).



Cándido intenta diferentes soluciones

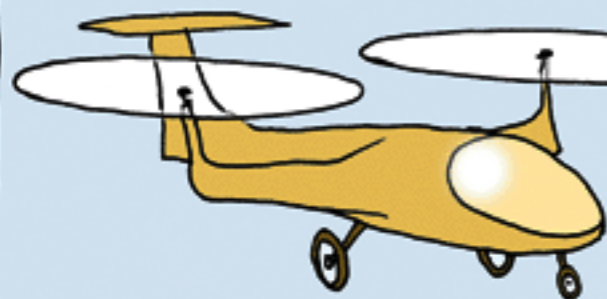


rotores laterales

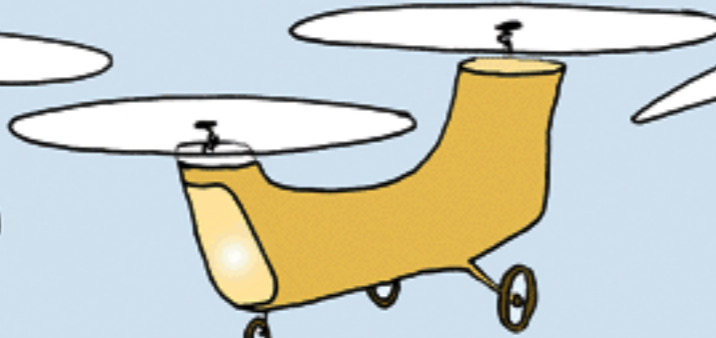
rotores en tándem

rotores engranados

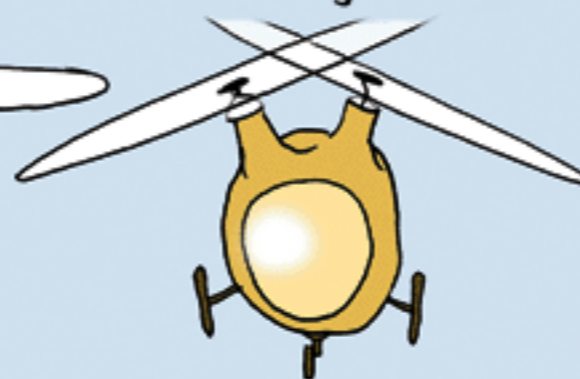
expulsión de gas al final de las palas



inventado por el inglés Cayley y retomado por el alemán Focke



inventado por el francés Cornu y desarrollado por Piasecki



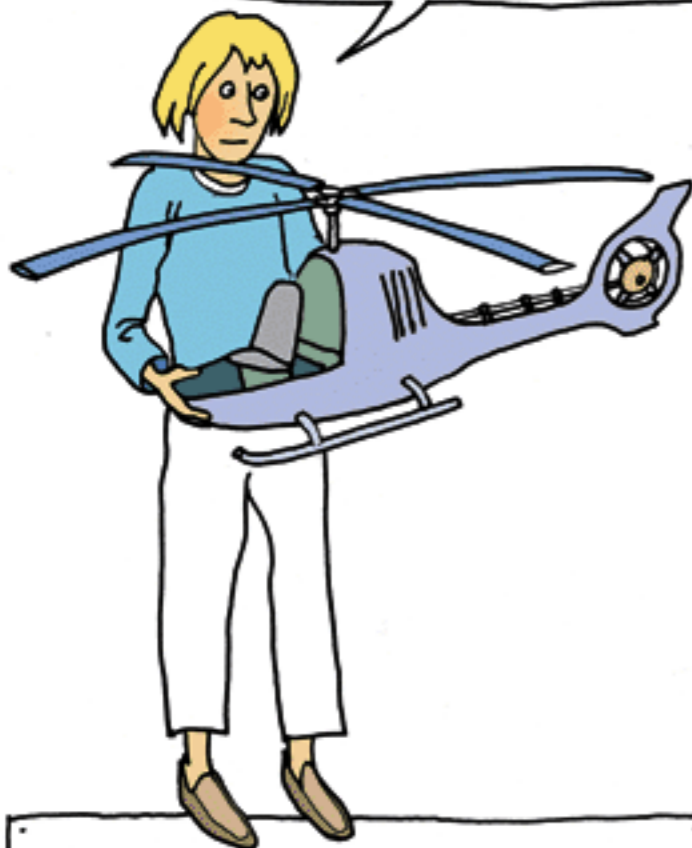
por el alemán Flettner, desarrollado por Kaman



"Djinn"  
(del francés Mora in)

Yves Le Bec escribió, ilustrándola con excelentes dibujos, una obra titulada "La véritable histoire de l'hélicoptère, de 1486 à 2005", publicada por Ediciones Ducretet SA, CH-1022 Chavannes-près-Renens, ISBN 2-8399-0100-5. En ella encontrarán todos los modelos de helicópteros imaginados por los humanos.

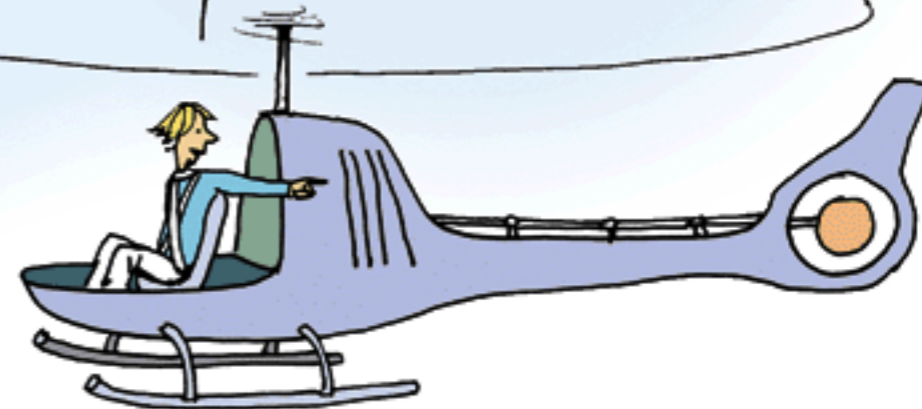
Voy a poner un rotor anti-par en el extremo del fuselaje. Acoplándolo mecánicamente al rotor principal, debería funcionar. Cuando aumente el régimen del motor, el rotor de la cola lo seguirá y la compensación del par quedará automáticamente asegurada



El rotor de cola anti-par fue ideado por el ruso Yuriev y desarrollado por Igor Sikorski.  
(\*) El "fenestrón" fue introducido por el francés Mouille.



¡Mira, Pangloss, lo logré!



Aléjate de inmediato o si no vas a ser succionado y cortado en pedacitos

Todo esto demuestra que todo marcha a la perfección en la mejor de las aeronáuticas posibles

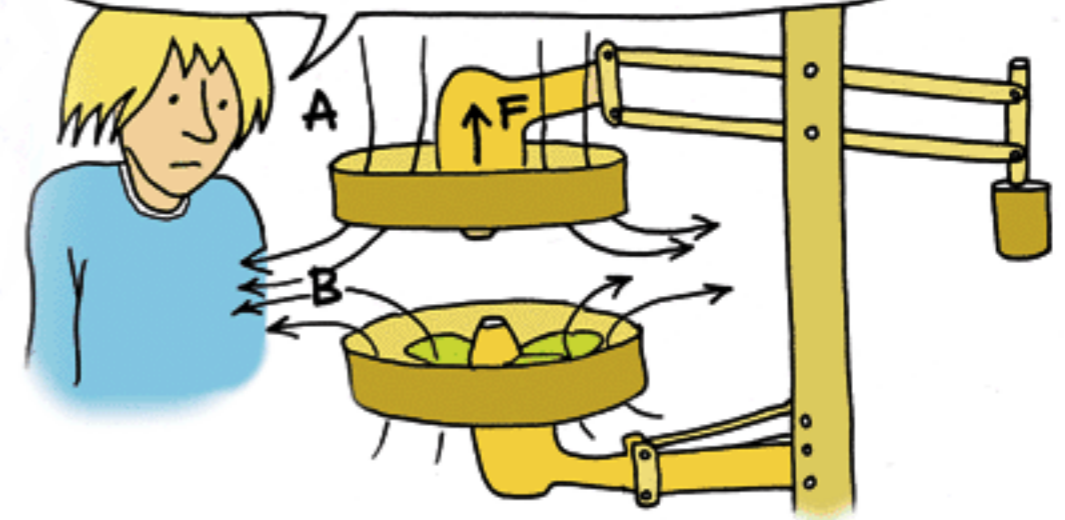


# EFEECTO SUELO

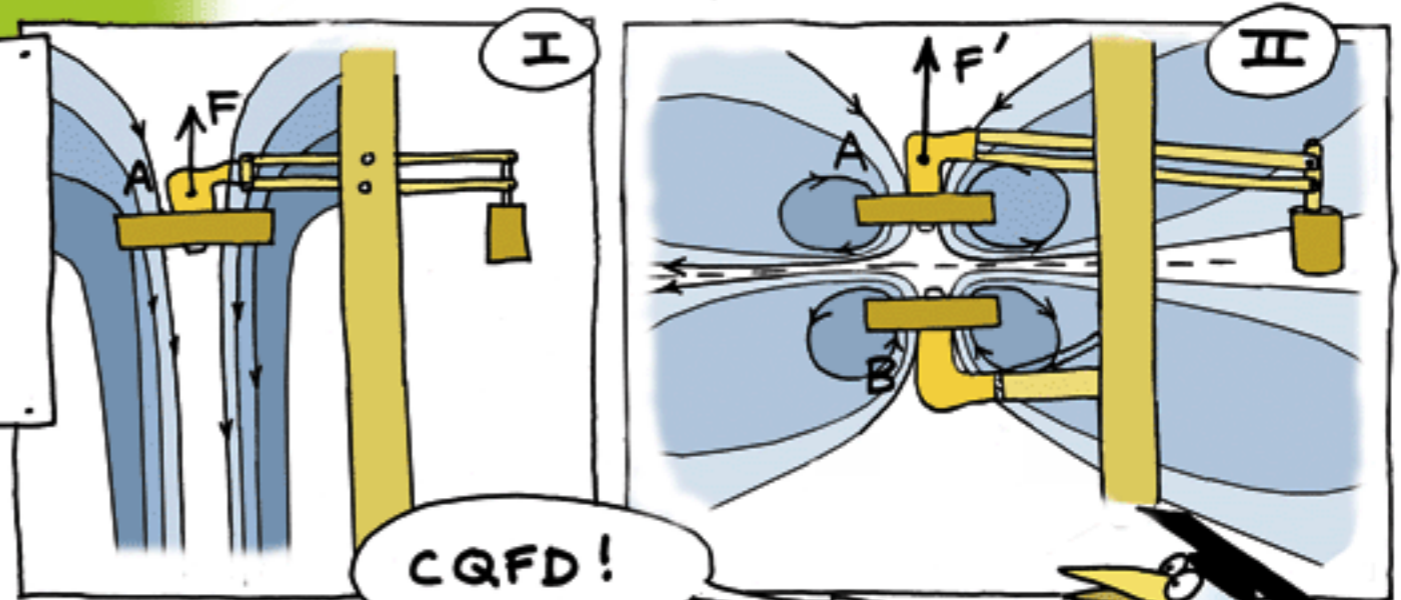
Es curioso. Cerca del suelo logro mantenerme con una potencia ostensiblemente menor (\*)



Esa máquina no es más que un ventilador grande. Voy a poner a trabajar dos juntos, colocándolos cara a cara



A igual régimen la fuerza ascensional que se ejerce sobre el ventilador **A** es mayor cuando éste trabaja frente al ventilador **B**, que empuja el aire en el otro sentido, a diferencia de cuando está sólo **A**



El flujo en II es el mismo que si se hiciera trabajar el ventilador **A** de cara al suelo

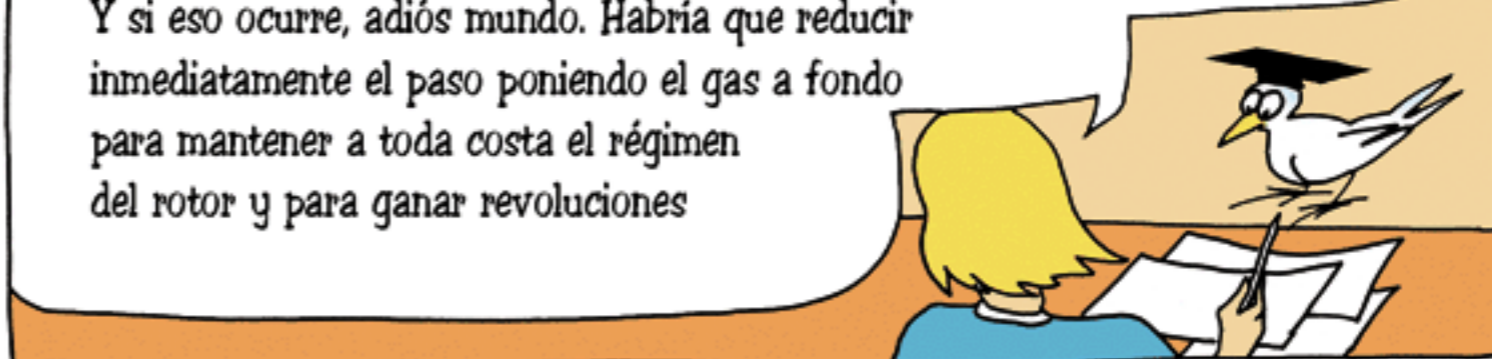
(\*) El efecto suelo se vuelve importante cuando el rotor está a una distancia del suelo igual o menor que la mitad de su diámetro.

# "AUMENTO DE REVOLUCIONES"

Mi rotor tiene un paso fijo, ¿pero de qué valor? Cuanto mayor sea el paso, mayor será la incidencia de las palas y por lo tanto mayor será también el **ARRASTRE** que frena la rotación de las palas...



Si por alguna razón mi motor experimenta una pérdida de potencia, el arrastre va a frenar su rotación (\*). Si la velocidad que corresponde al **VIENTO RELATIVO** disminuye, la pérdida se va a extender a todo el perfil. Y si eso ocurre, adiós mundo. Habría que reducir inmediatamente el paso poniendo el gas a fondo para mantener a toda costa el régimen del rotor y para ganar revoluciones



¿Qué es lo que dice?



Eso no te concierne.  
No tienes ninguna parte giratoria,  
que yo sepa...

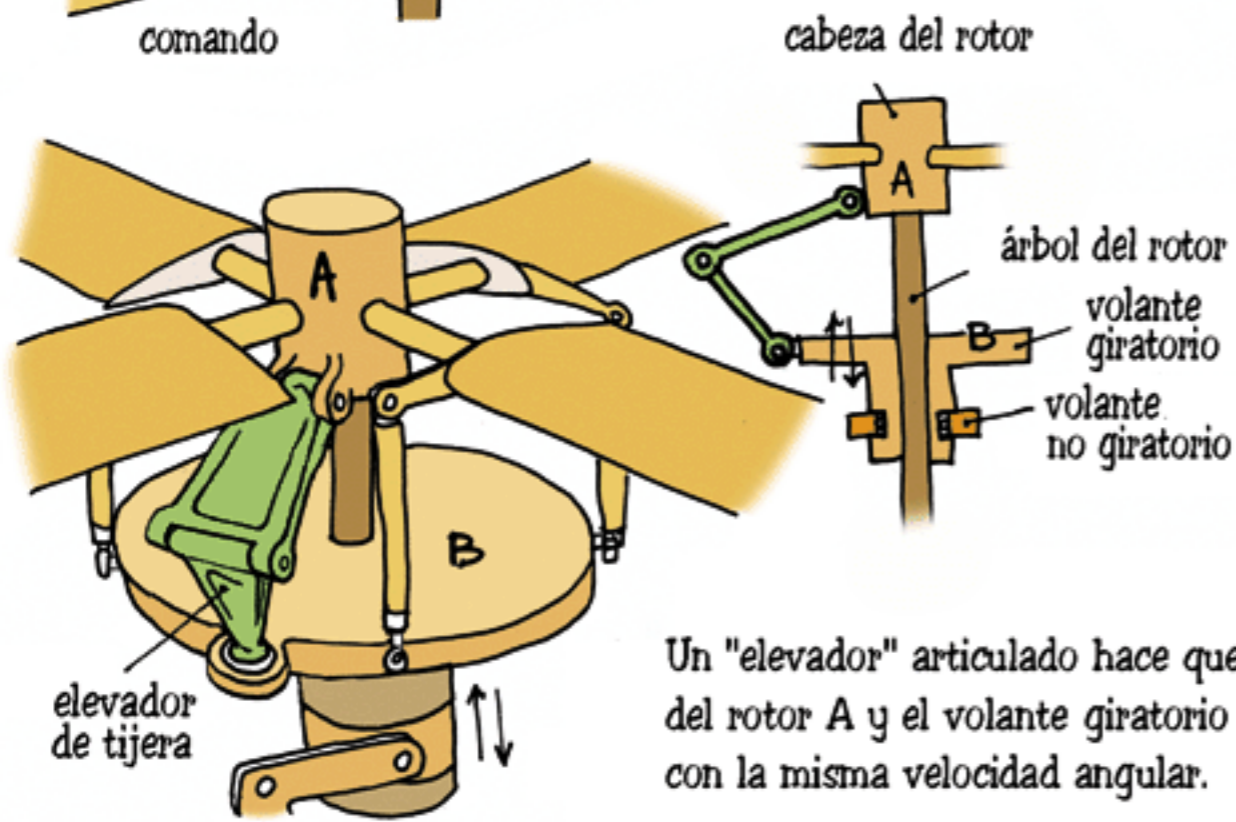
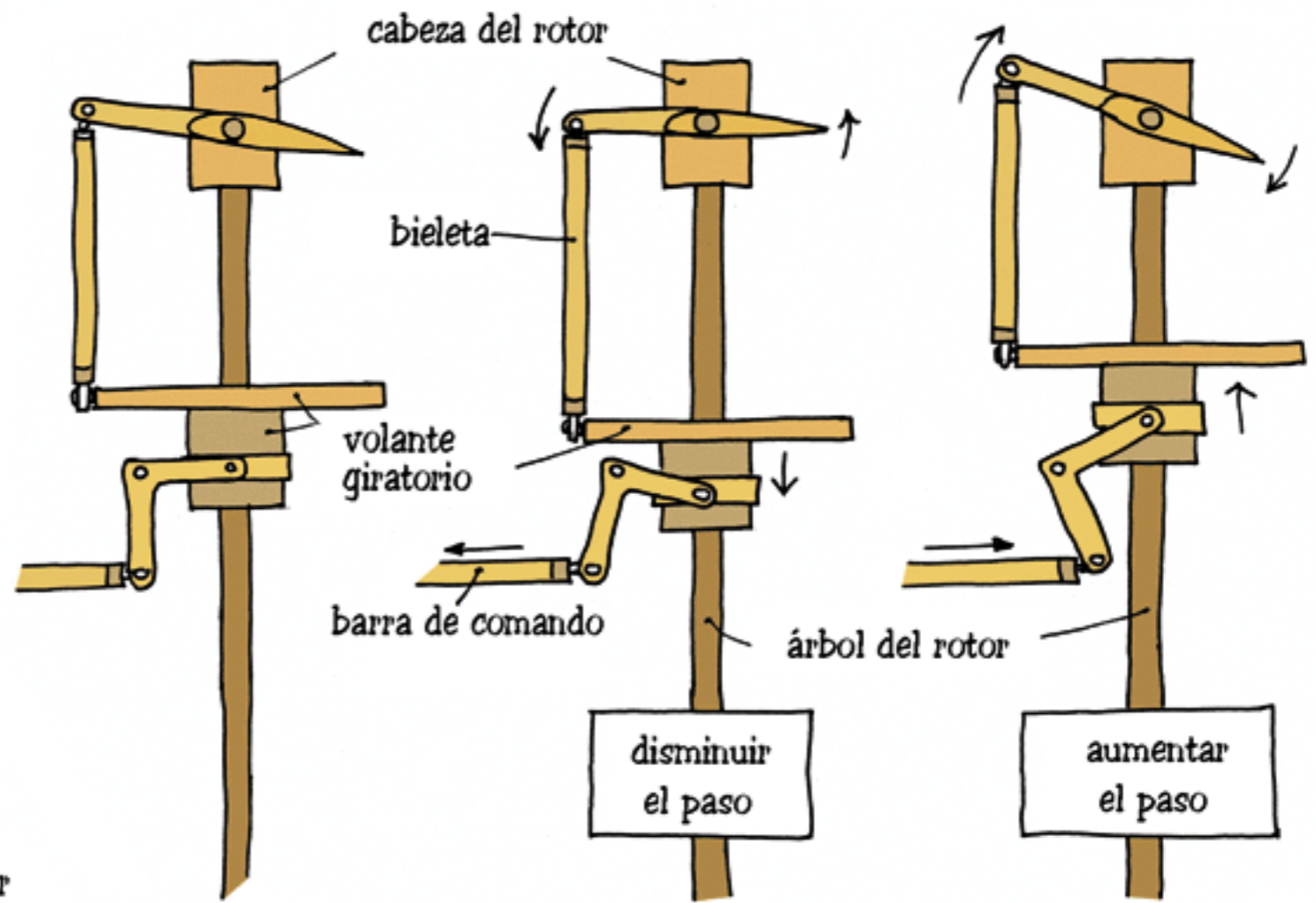
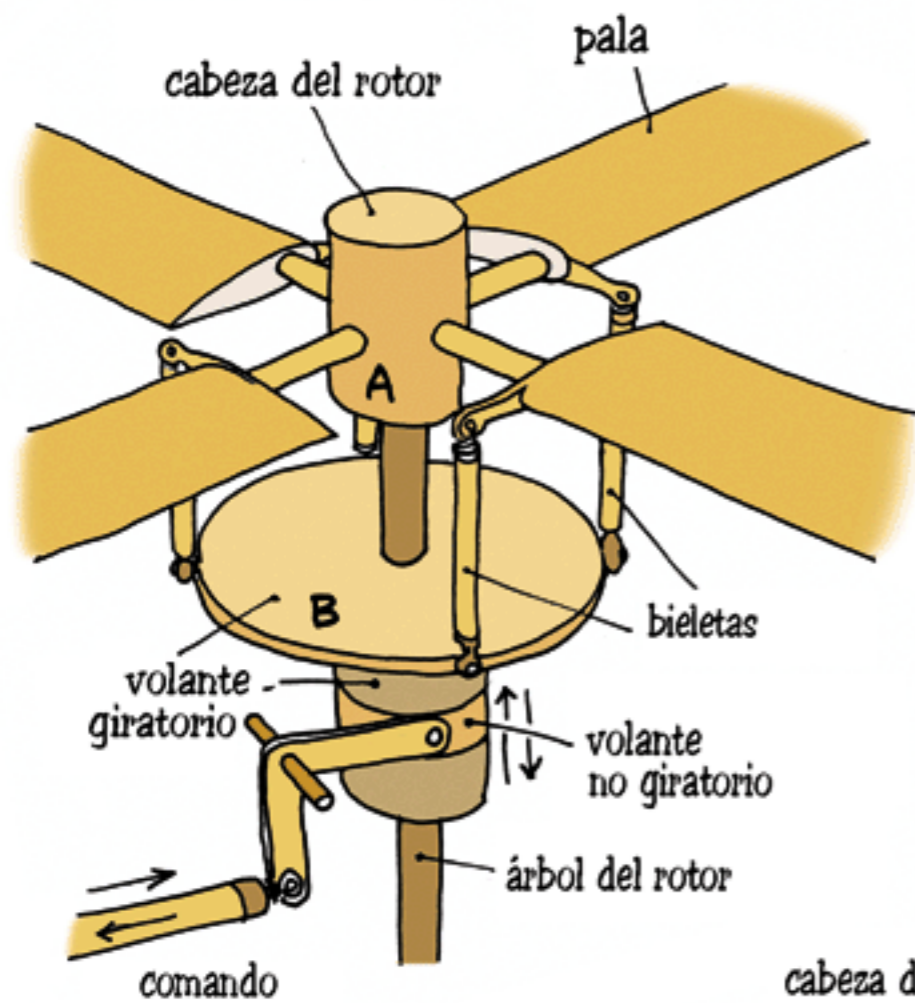
Pues tal parece  
que no



Es necesario que modifique el paso, es decir el ángulo de ataque de las palas cuando esté en vuelo



(\* ) Un rotor en el que el motor cesara bruscamente de funcionar se frenaría peligrosamente en... ¡un segundo!



Un "elevador" articulado hace que la cabeza del rotor A y el volante giratorio B giren con la misma velocidad angular.

Con un sistema de este tipo se puede hacer variar conjuntamente el paso de las palas de un rotor actuando sobre un volante no giratorio B unido por un par de rodamientos a un volante giratorio A, que retransmite la orden a las palas por medio de las bieletas.

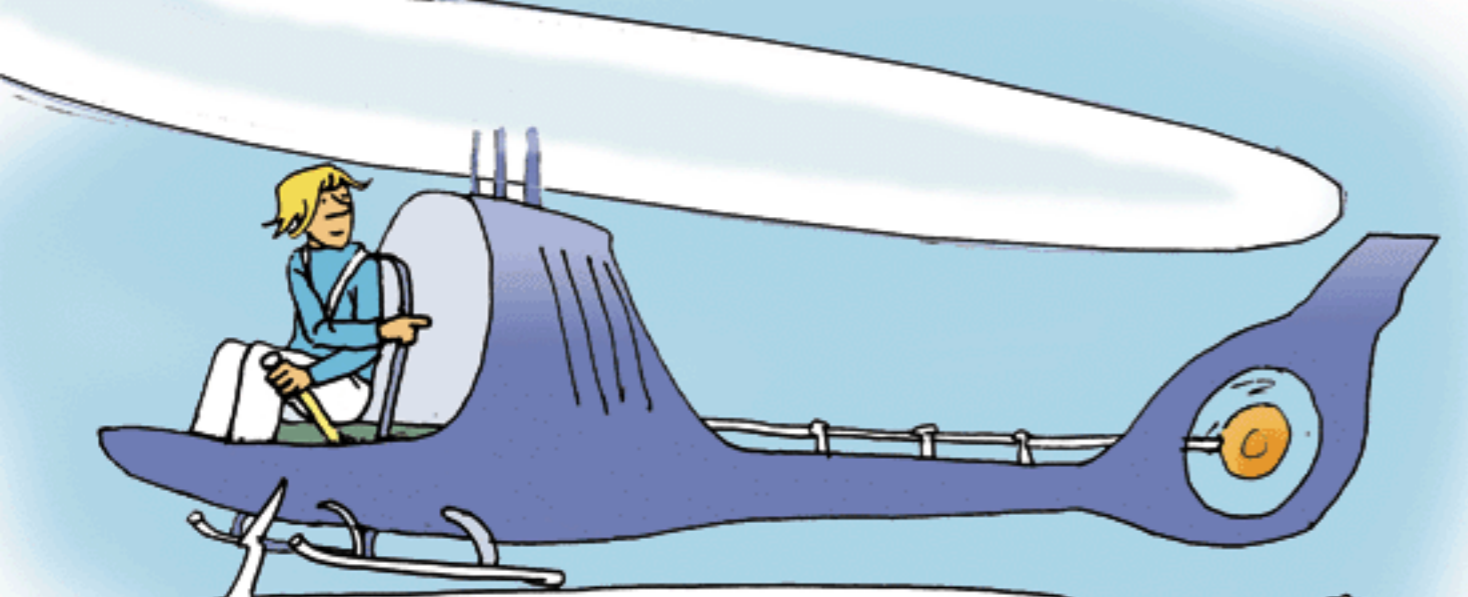
*La Dirección*

He adaptado una varilla de comando que me permite variar a voluntad el paso general con la ayuda de una palanca desde mi propia silla

También he puesto el comando de los gases aquí abajo

mango giratorio:  
comando de los gases

palanca hacia arriba : aumentar el paso  
palanca hacia abajo : disminuir el paso



He adaptado el mismo sistema en el rotor de cola, anti-par, para evitar desvíos bruscos cuando modifico el paso general. Y he añadido un comando en los pies, un pedal, que me permite dar vueltas en un mismo lugar

¿Qué?  
No entiendo nada...

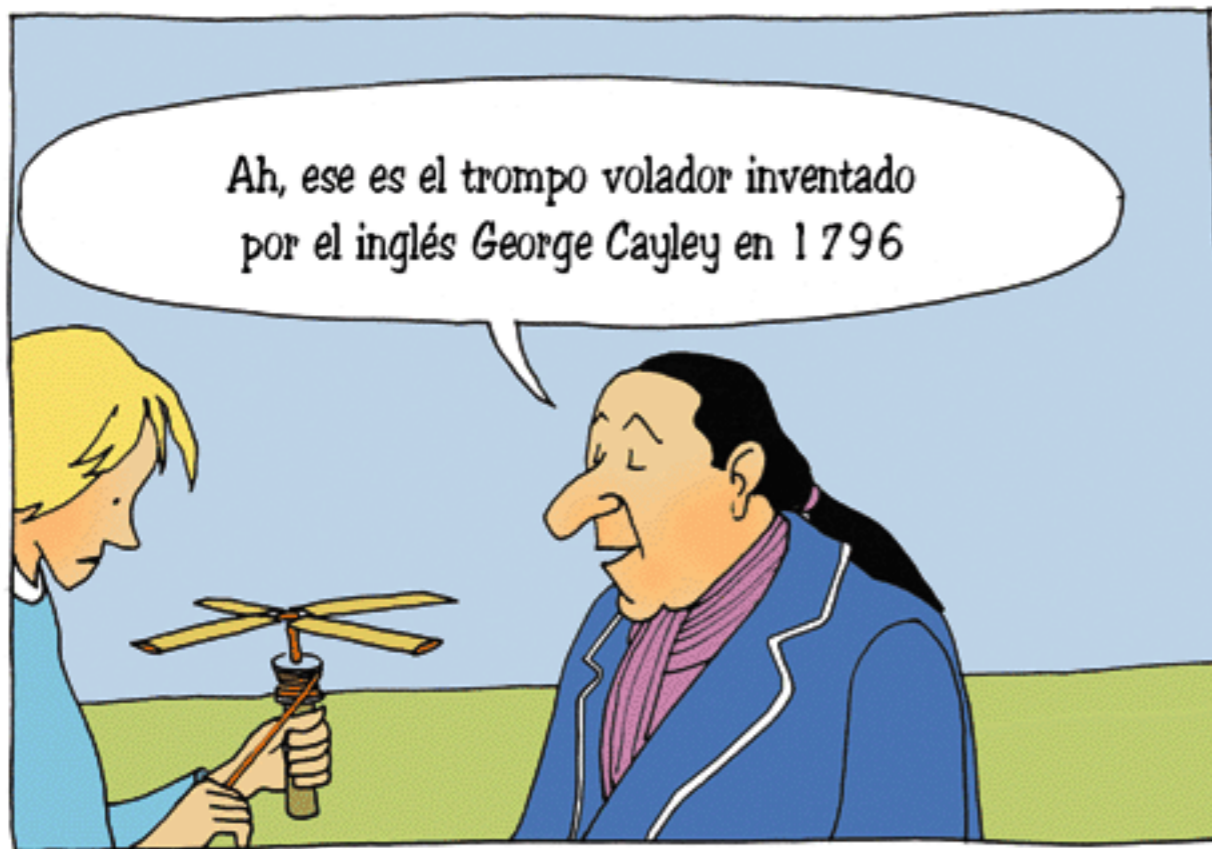
Bueno. He concebido esta máquina voladora capaz de transportarnos a Cunegunda y a mí. Puedo subir, bajar y girar sobre mí mismo a voluntad. Pero queda una cuestión: ¿cómo avanzar?



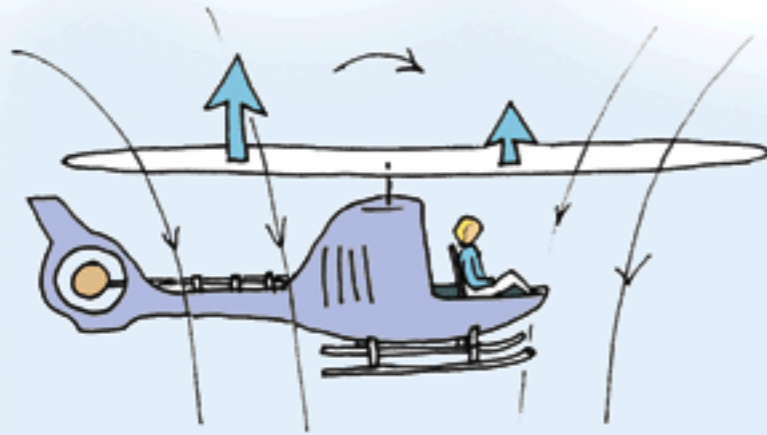
¿Por qué no agregarle una hélice, unos timones?

Todo eso me parece muy complicado

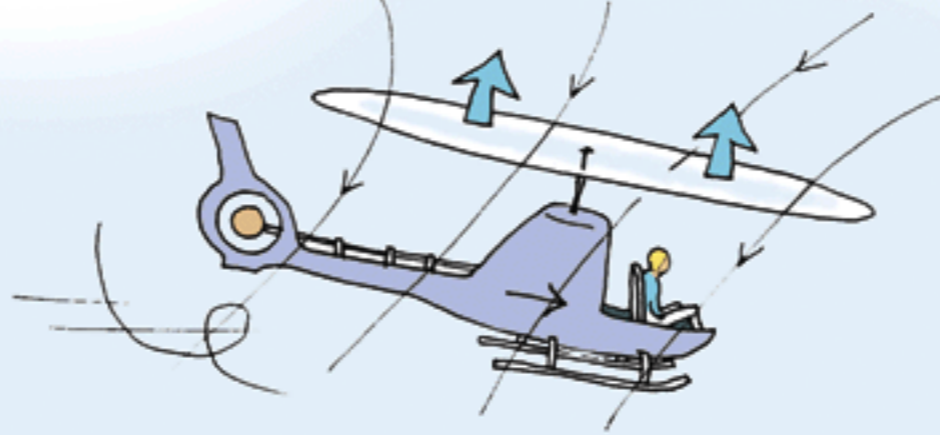




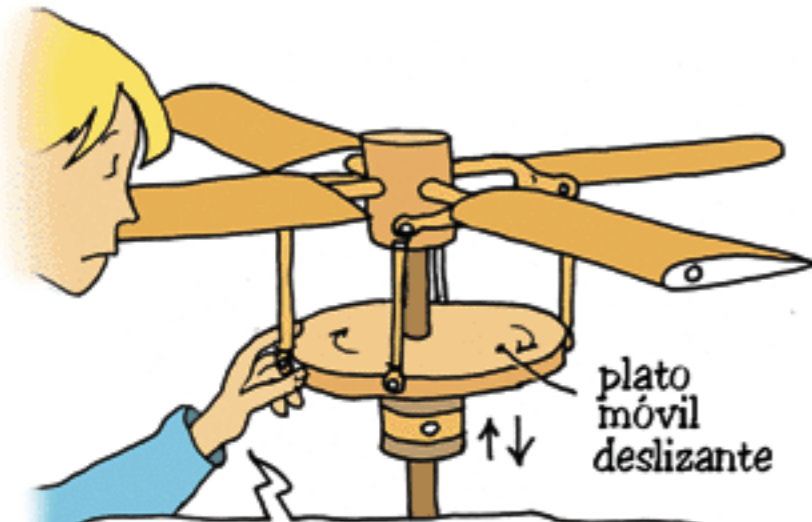
## ESTACIONARIO



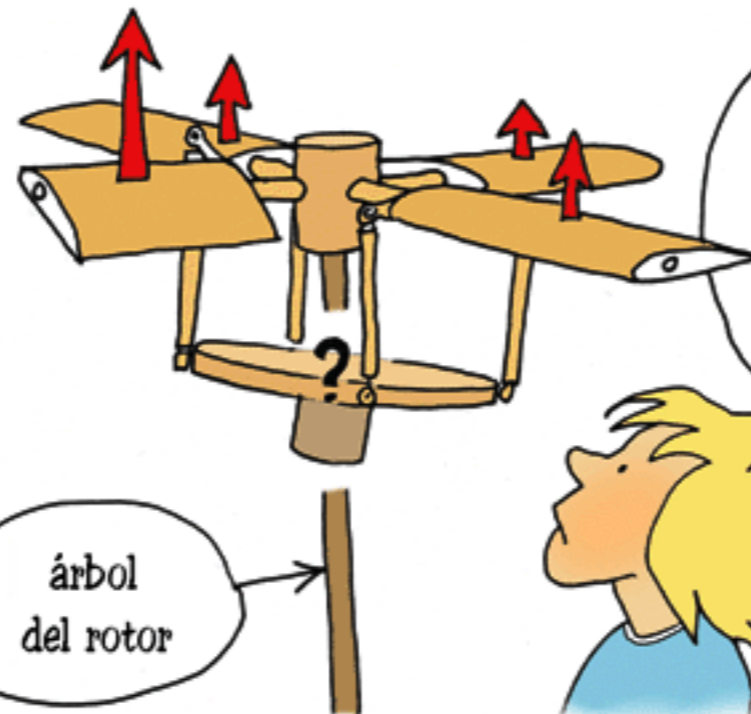
## TRANSLACIÓN



Si logro aumentar la sustentación de las palas de mi rotor cuando están hacia atrás, y disminuirla cuando están hacia adelante, con la ayuda de una **VARIACIÓN CÍCLICA DEL PASO** podría conseguir el equilibrio de mi máquina y convertirlo en un movimiento de **TRANSLACIÓN**

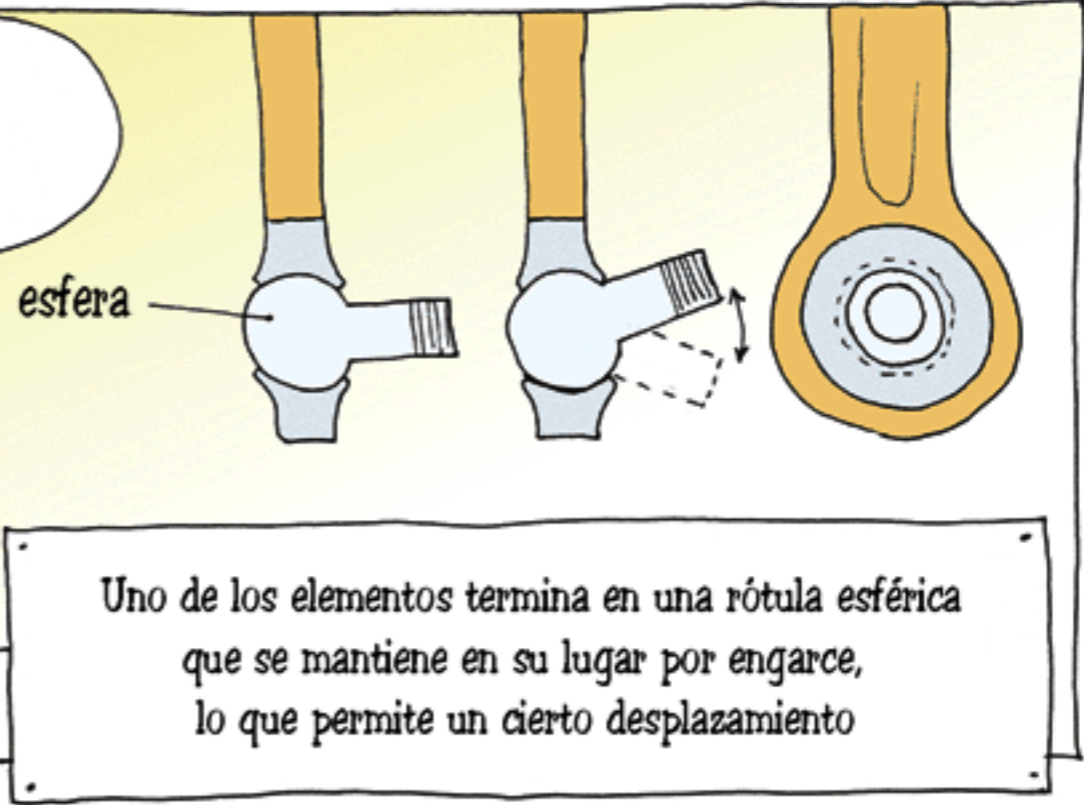


El paso de mis palas está dado por la posición de un plato giratorio deslizante sobre el árbol del rotor



Si pudiera lograr que este plato tuviera una inclinación, al girar el conjunto podría crear la variación cíclica del paso (\*) de las palas. ¿Pero cómo articular y controlar toda esa parafernalia?

(\*) Inventada por el español **PESCARA**, quien introdujo el concepto de **AUTORROTACIÓN**

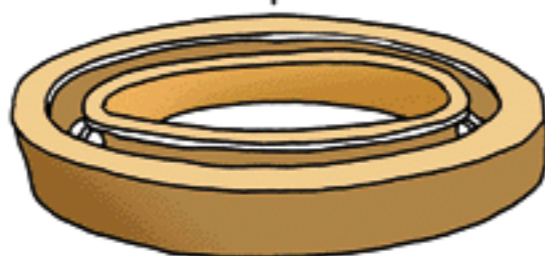


La vida de un piloto de helicóptero está ligada a una mecánica compleja que pone en juego bieletas de este tipo, engranajes, rodamientos, todos ellos fabricados con la mayor precisión, monitoreados y reemplazados periódicamente. Los costos de fabricación y de mantenimiento son más importantes que los de un avión. A partir de los años sesenta la utilización de nuevos materiales: compuestos, elastómeros y componentes autolubricados han permitido reducir la complejidad, el peso, los costos de fabricación y la frecuencia de mantenimiento, y a la vez ganar mayor fiabilidad. Pero todos estos aspectos escapan de los propósitos de la presente obra.



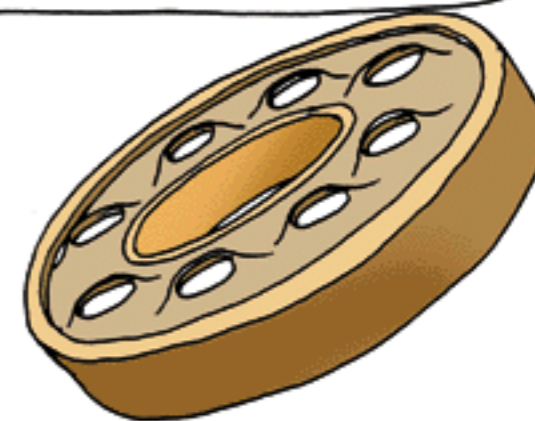
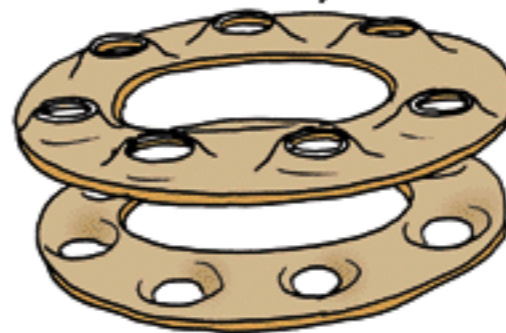


Un elemento muy importante es el cojinete con sus rodamientos

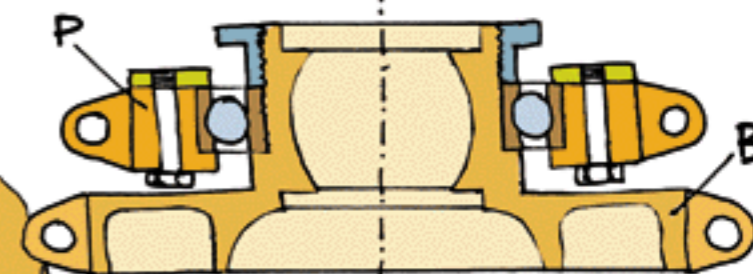
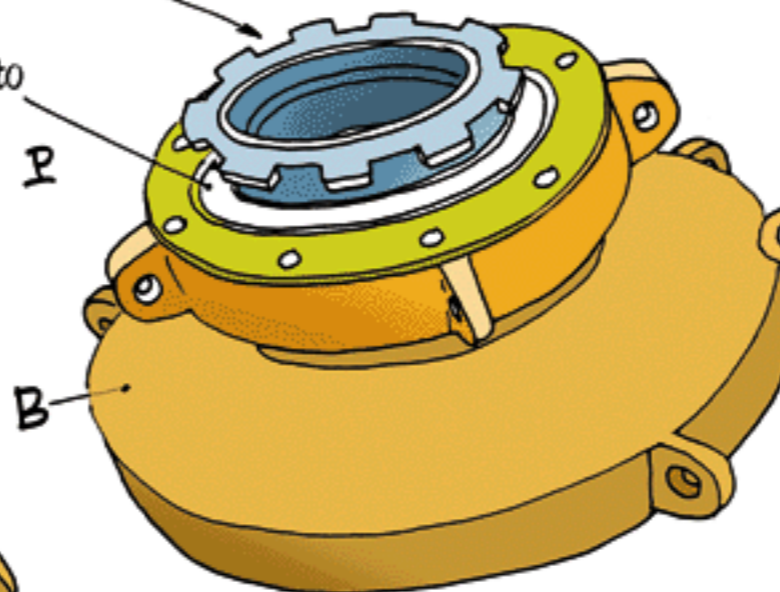
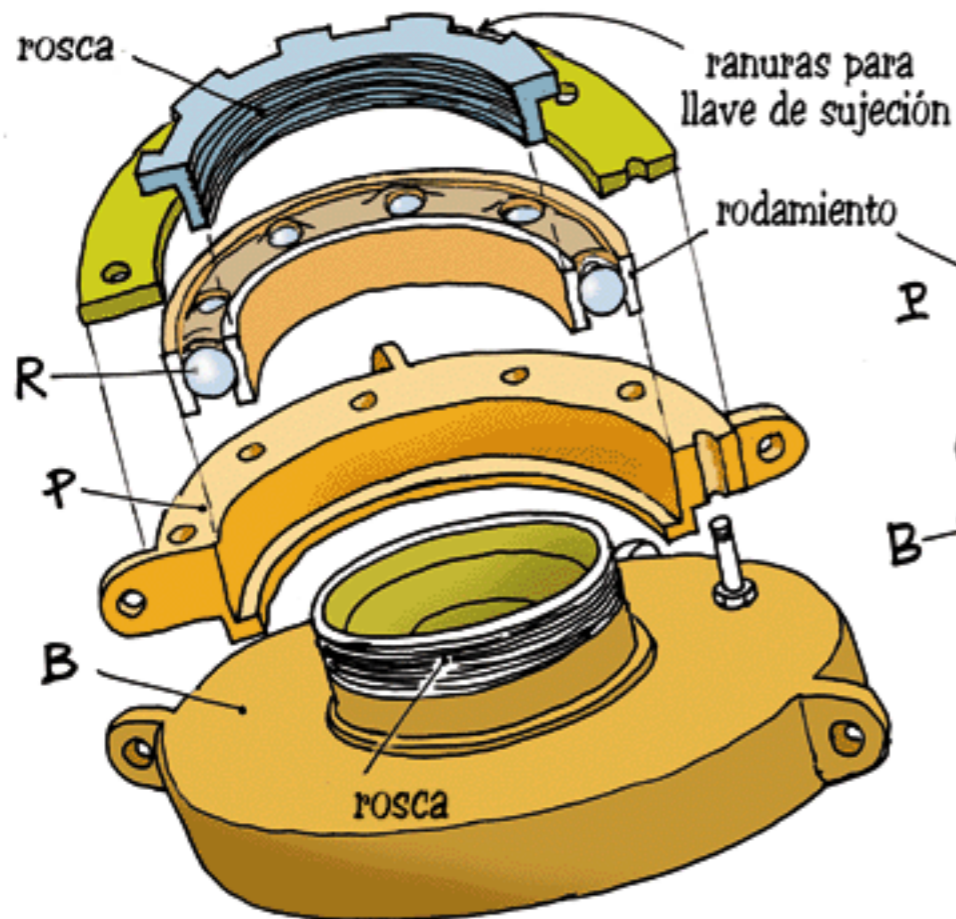




¿Pero cómo incrustar las benditas esferas?

Al descentrar los anillos se puede introducir un cierto número de esferas



Estas se mantienen en su lugar mediante una trampa formada por dos elementos soldados, engastados o pegados



El rodamiento permite a dos platos, uno giratorio **P**  y otro no giratorio **B**  moverse uno con respecto al otro permaneciendo coaxiales.

No quiero hacerle sentir mal, amigo,  
pero en el plano mecánico su avión,  
al lado de éste, es un chiste

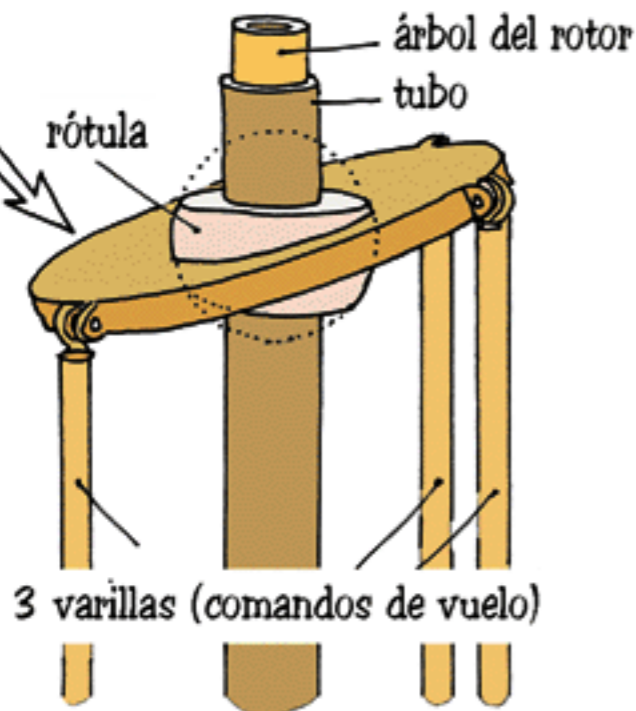


Para enderezar algo que funciona al revés,  
la solución es la **RÓTULA**



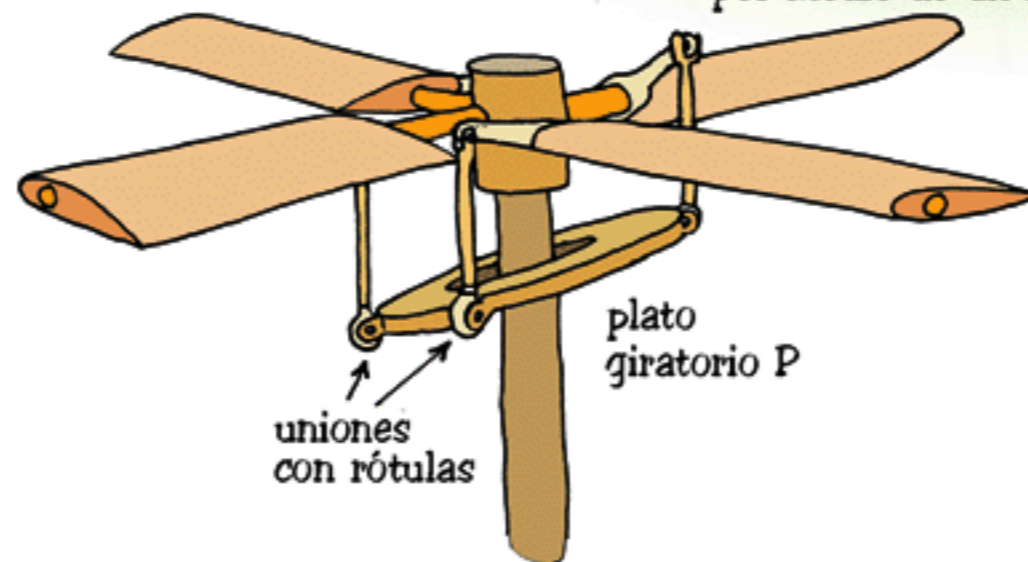
Rótula que se deslizará  
sobre un **TUBO** en el interior  
del cual girará el  
**ÁRBOL DEL ROTOR**

Sobre esta rótula hará pivote un plato B  
no giratorio, cuya orientación será fijada  
por las varillas de comando de vuelo



El plato no giratorio B será solidario con un plato giratorio P  
por medio de un rodamiento (ver página precedente).

El plato giratorio controlará la  
inclinación de las palas mediante  
bioletas de mando de paso.



Antes de concluir este estudio sobre el plato oscilante hay que resolver algunos problemas.

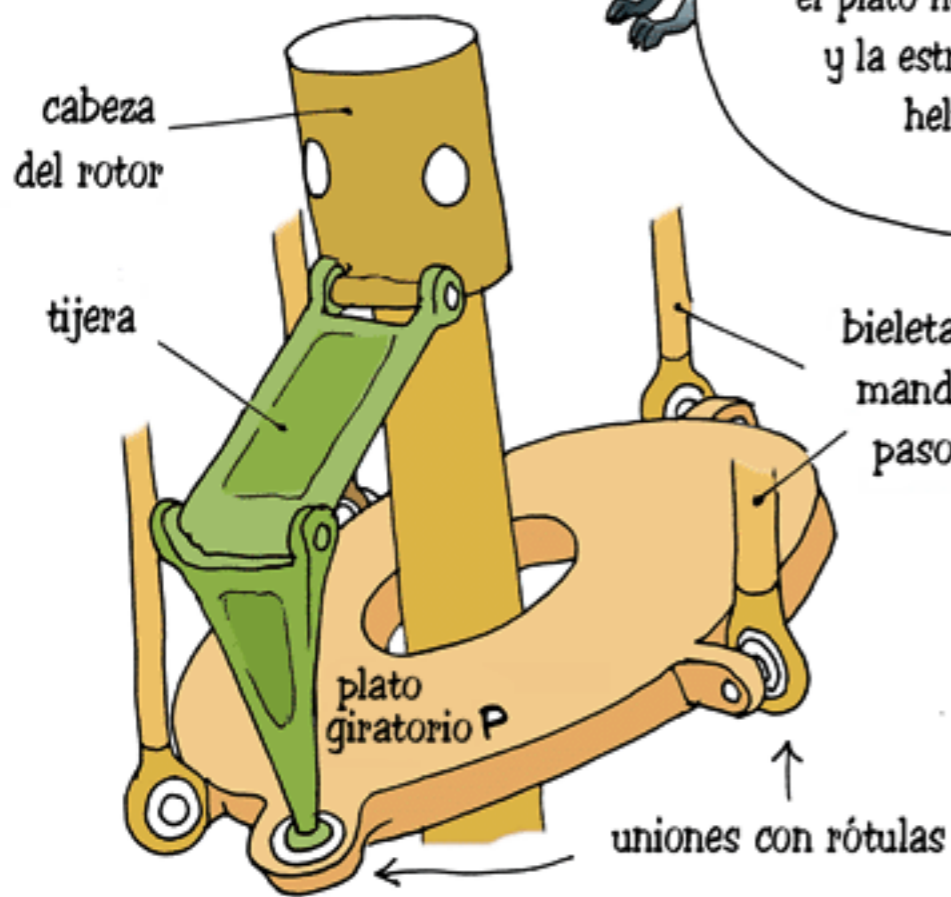
Primero: cómo hacer solidario el plato giratorio P con la cabeza del rotor.

¿Vamos a dejarle esa tarea a las frágiles bieletas?

Segunda cuestión: ¿cómo colocar la rótula en su lugar, ubicado en el plato B?

No, una tijera se hará cargo. Y pondremos el mismo dispositivo entre el plato no giratorio B y la estructura del helicóptero

La rótula es un anillo de teflón, autolubricado y hueco, en el que la parte interna es cilíndrica y la parte externa esférica. Deformándola como se indica en el dibujo se la puede deslizar en su sitio sin dificultad. En seguida se puede insertar todo dentro del tubo en cuyo interior gira el eje del rotor



VER SÍNTESIS EN LA PÁGINA SIGUIENTE →

# PLATO OSCILANTE

unión para bieleta

cierre

unión para varilla de comando

árbol del rotor

tubo

árbol del rotor

agarre para fijar tijera II

rosca

elevador de tijera II

anillo de sujeción (tuerca)

cierre empernado

plato giratorio

plato no giratorio

elevador de tijera I

uniones para bieletas de mando de paso

uniones para varillas de comando

unión para elevador II

anillo de teflón, hendido para permitir el montaje

parte esférica (rótula)

ranuras para permitir adaptación de una pieza de sujeción

partes esféricas

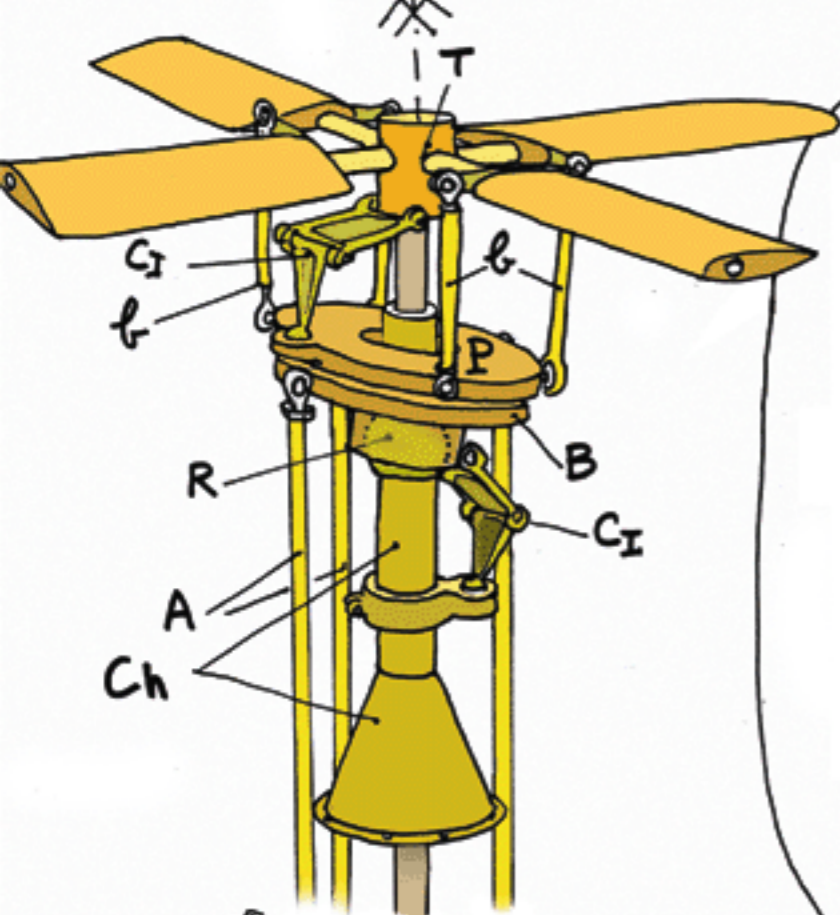
rosca para insertar anillo de sujeción (tuerca)

unión para elevador I

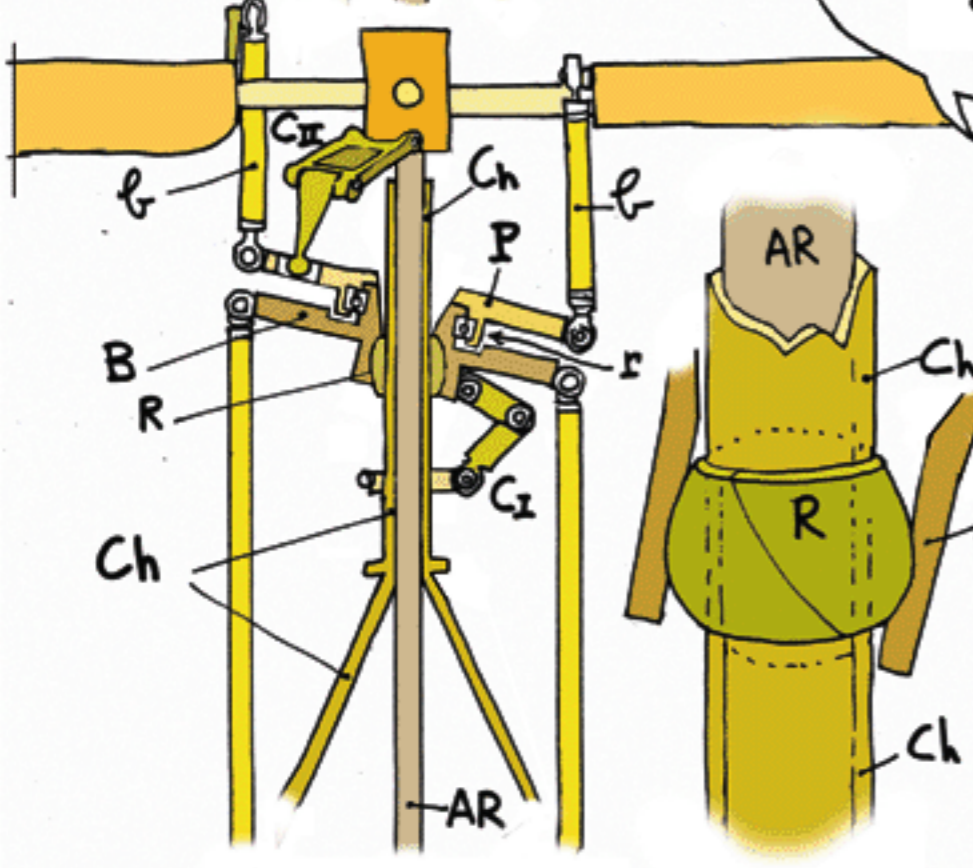
tubo

La helico-mecánica requiere trucos de astucia para dar con montajes simples, sólidos, livianos y resistentes, y que precisen del mínimo número de piezas





Volvamos a una descripción esquemática, más legible. Varillaje de comando **A**, constituido por tres barras, hace subir, bajar y balancear en todas direcciones un plato no giratorio **B**, guiado por la rótula **R**, la cual se desliza libremente sobre el tubo **Ch**, solidario con la estructura del helicóptero. Un primer **ELEVADOR DE TIJERA C<sub>I</sub>**, fijo sobre el tubo **Ch**, se opone a cualquier movimiento de rotación del plato **B** en relación con la estructura del helicóptero (tubo **Ch**). El plato giratorio oscilante **P** está unido mediante un rodamiento **r** al plato no giratorio **B**. La altura del plato **B** es fijada por el piloto por medio del varillaje de comando **A**. El plato **P** transmite la orden a las palas por medio de las bieletas **b**, y un segundo elevador de tijera **C<sub>II</sub>** vuelve solidarias la cabeza del rotor **T** y el plato giratorio oscilante **P** puesto que sin él las bieletas de mando de paso **b** que tuvieran que hacer sus veces se romperían de inmediato

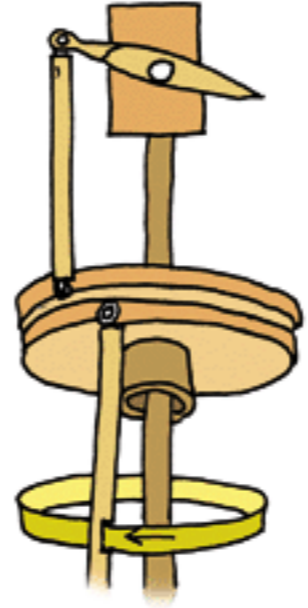
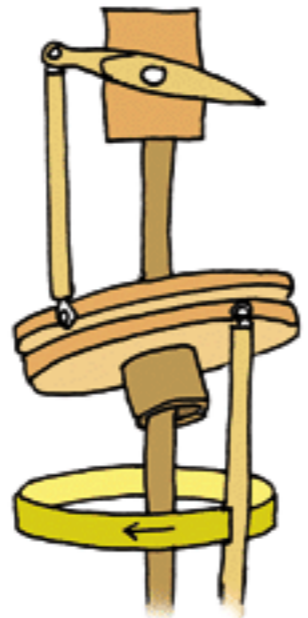
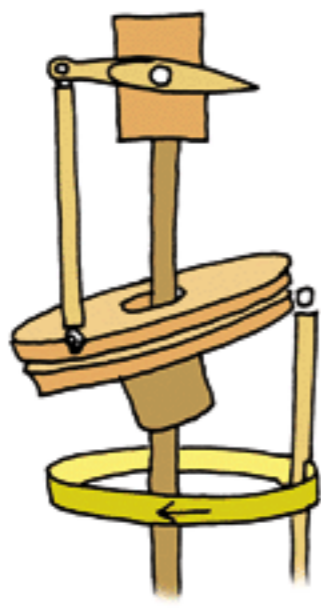
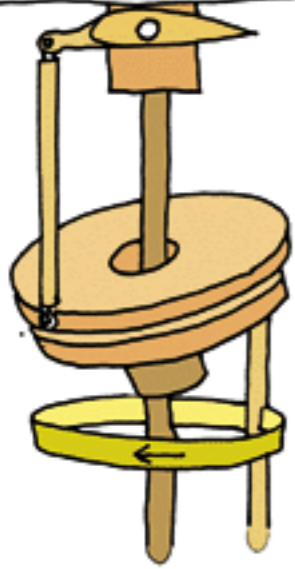


Ahora me hace falta idear **MANDOS DE VUELO** que me permitan accionar las tres barras verticales

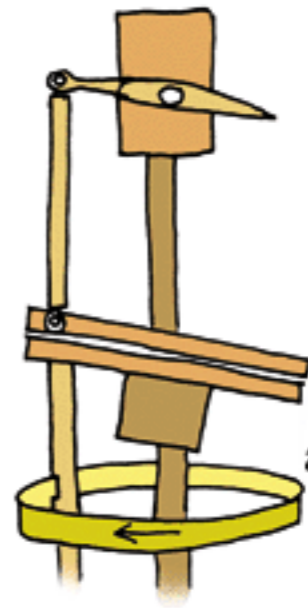
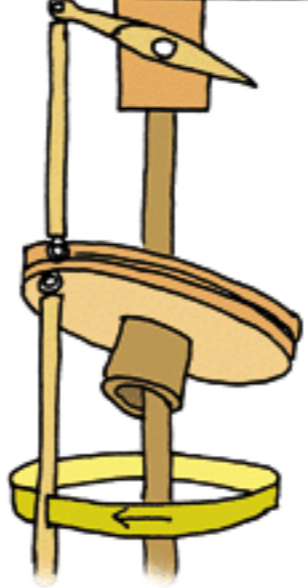


Y todo estará listo

incidencia mínima

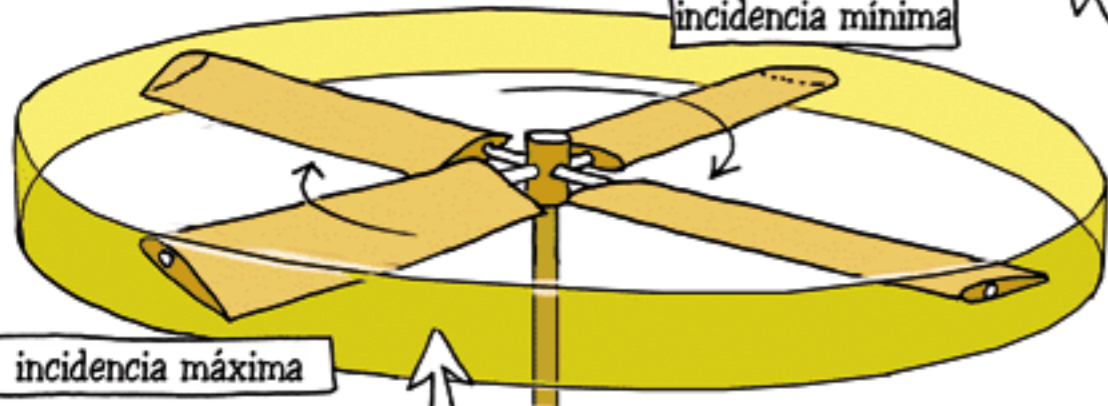


incidencia máxima



etc...  
abajo, movimiento  
aparente de una de  
las varillas de  
comando

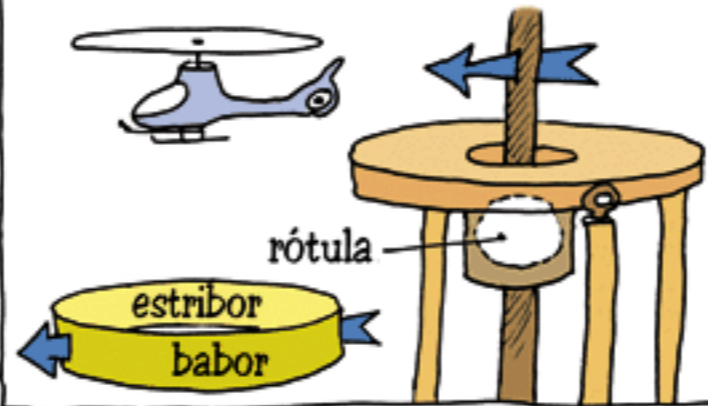
incidencia mínima



incidencia máxima

Aquí las palas ocupan cuatro posiciones  
diferentes en el plano de rotación

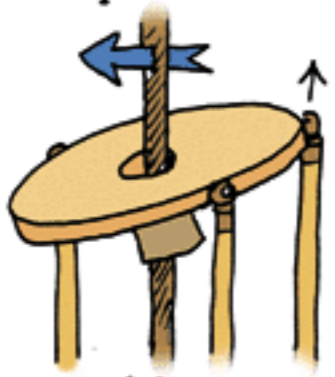
Aquí acompañamos una pala en su movimiento. Su incidencia  
varía periódicamente entre un valor mínimo y un valor máximo



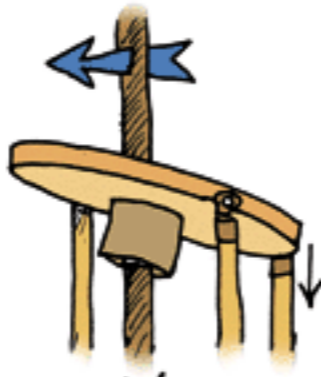
La flecha apunta hacia la parte  
frontal del aparato

Tres varillas son suficientes para  
controlar la altura del plato no  
giratorio

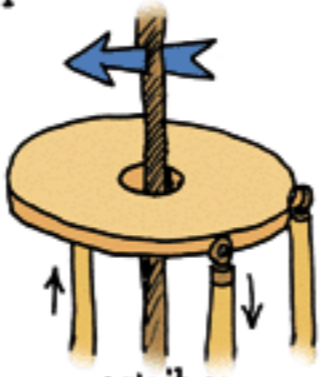
Pilotar el helicóptero aumentando la incidencia de la pala.



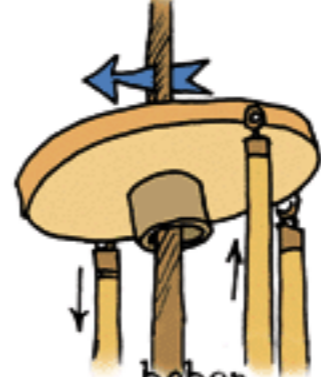
adelante



atrás

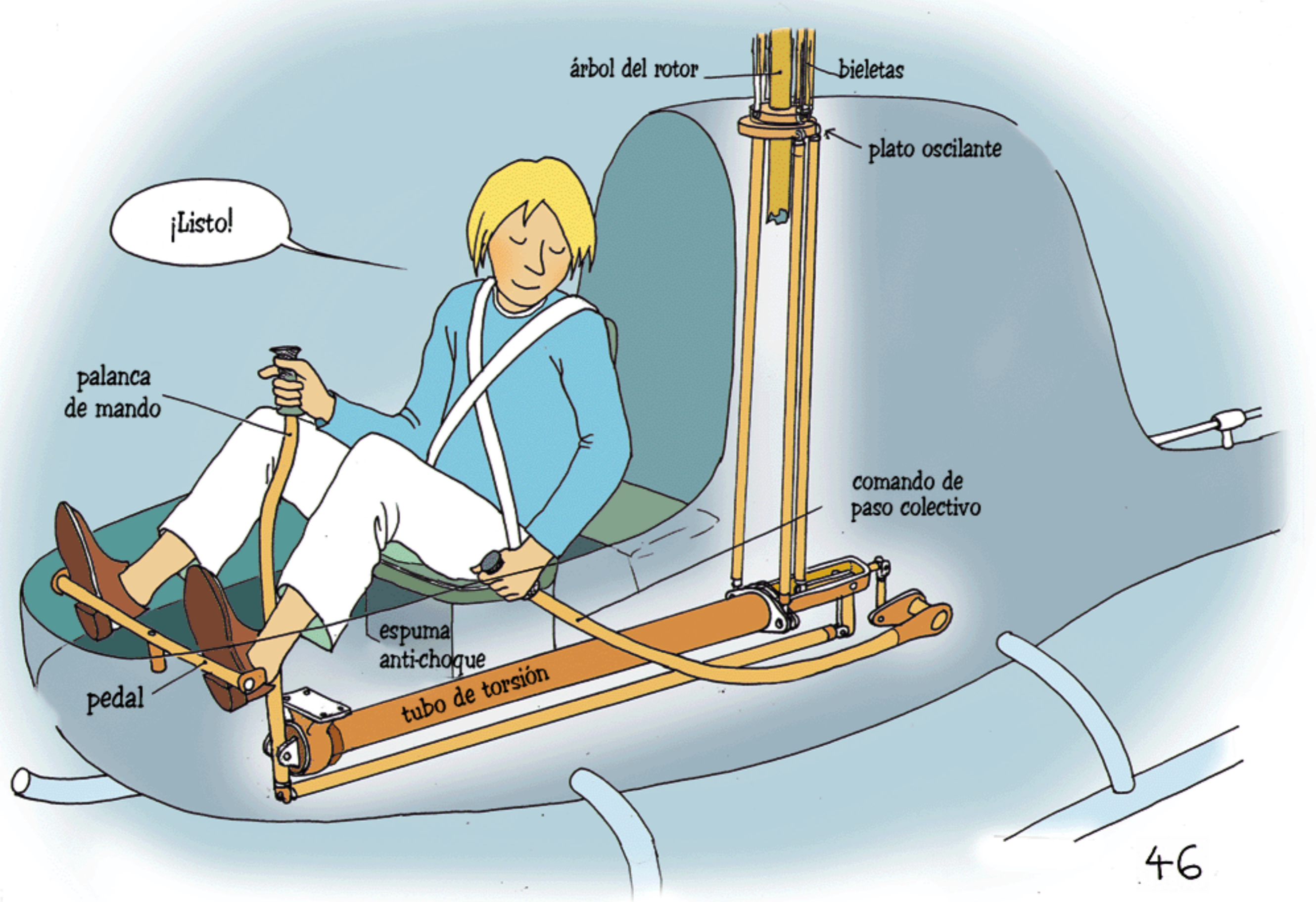


estribor



babor

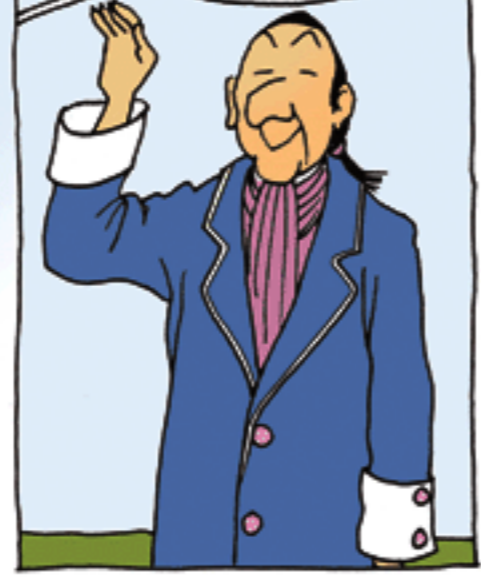




Esta vez, Pangloss, todo está preparado. Ahora sí voy a poder liberar a la señorita Cunegunda



¡En marcha!



PATAKLONK  
PATAKLONK  
PATAKLONK



Es terrible, maestro. Había tantas vibraciones que creí que mi máquina se iba a partir en mil pedazos



Pero eso no es lo peor...



¿Y entonces qué es, mi buen Cándido?

Creía que estaba poniendo en práctica la mejor de las mecánicas de fluidos posibles



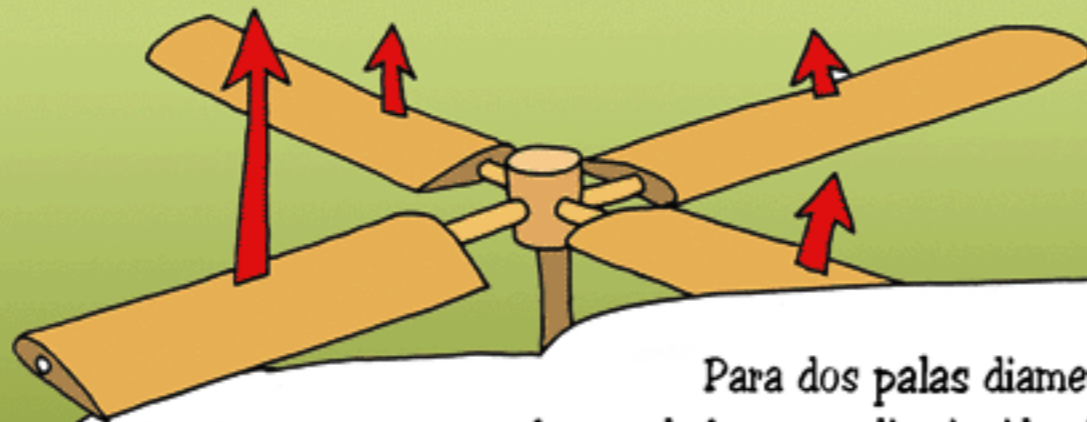
Figúrate, buen maestro, que cuando empujé la palanca hacia adelante...








Pude sentir muy bien que la máquina se sacudió desde el momento en que puse en marcha la variación cíclica del paso. Fue como si una mano invisible hubiese agarrado el rotor por la mitad. Ahora, observándolo de cerca, me parece que adivino la razón suficiente de ese fenómeno




Para dos palas diametralmente opuestas en las que he aumentado el paso de la una y disminuido el de la otra, las fuerzas aerodinámicas difieren en intensidad y en dirección, lo que explica las fuertes vibraciones



Pude sentir que si hubiera insistido,  
mi rotor se habría podido partir

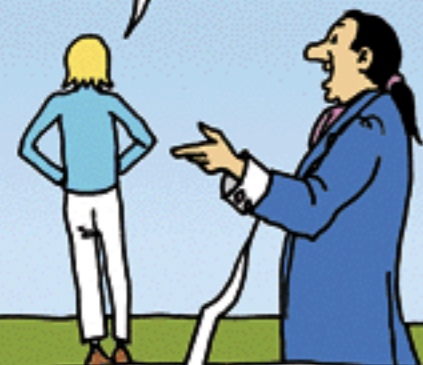
Por qué no hacer de modo que estas palas se  
muevan libremente, bien sea hacia arriba,  
hacia abajo, hacia adelante o hacia atrás,  
y dejar que la fuerza centrífuga se encargue  
de mantenerlas aseguradas

¡Funciona, Pangloss, funciona!  
La máquina se sacude un poco pero no  
de manera intolerable. Pero su respuesta a  
los movimientos de la palanca sigue  
siendo incomprensible. Al moverla hacia  
adelante, se desplaza hacia la derecha.  
Al moverla a la derecha, se encabrita  
y va hacia atrás. Con la palanca hacia la  
izquierda, se va de nariz y marcha hacia  
adelante. Al moverla hacia atrás,  
se dirige hacia su izquierda



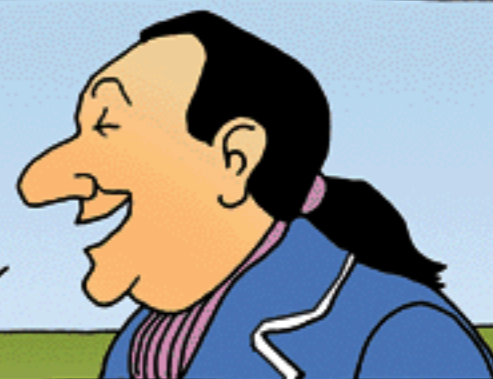
Lo que quiere decir que tu máquina obedece a tus órdenes,  
pero produciendo los efectos con un retraso de... 90°

Es incomprendible pero así es



Bueno, pero tienes la solución. ¡Modifica los comandos consecuentemente!

Mi buen maestro, de ninguna manera me voy a sentar en una máquina cuyo comportamiento en ese aspecto escapa a mi entendimiento



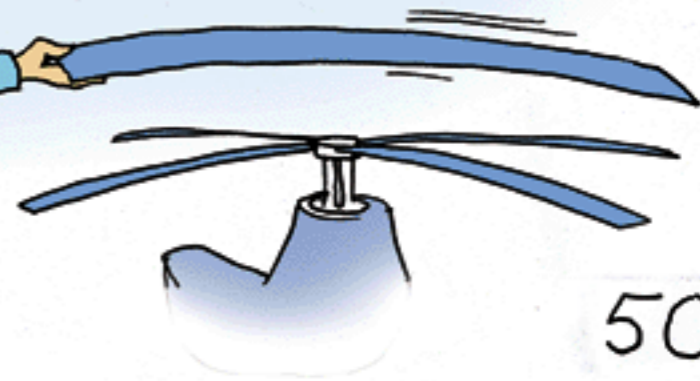
Cándido, Cándido, cuántas cosas tienen para nosotros apariencias familiares cuya esencia nos es ajena. Mira: el Sol gira alrededor de la Tierra y no sabemos porqué. Desconocemos la naturaleza de ese horror al vacío que hace subir al mercurio en los barómetros. La razón suficiente de esa energía oscura que provoca la reaceleración de nuestro Cosmos nos evade. ¿Debemos por eso abstenernos de observar y de medir todos esos fenómenos que nos ofrece la Naturaleza?




¿Y qué me dices del amor, Cándido, de los tiernos sentimientos que tienes por la señorita Cunegunda?



Si esta mecánica del vuelo es la mejor de las mecánicas posibles, cómo serán entonces las otras...



# COMPENSACIÓN DEL CICLO



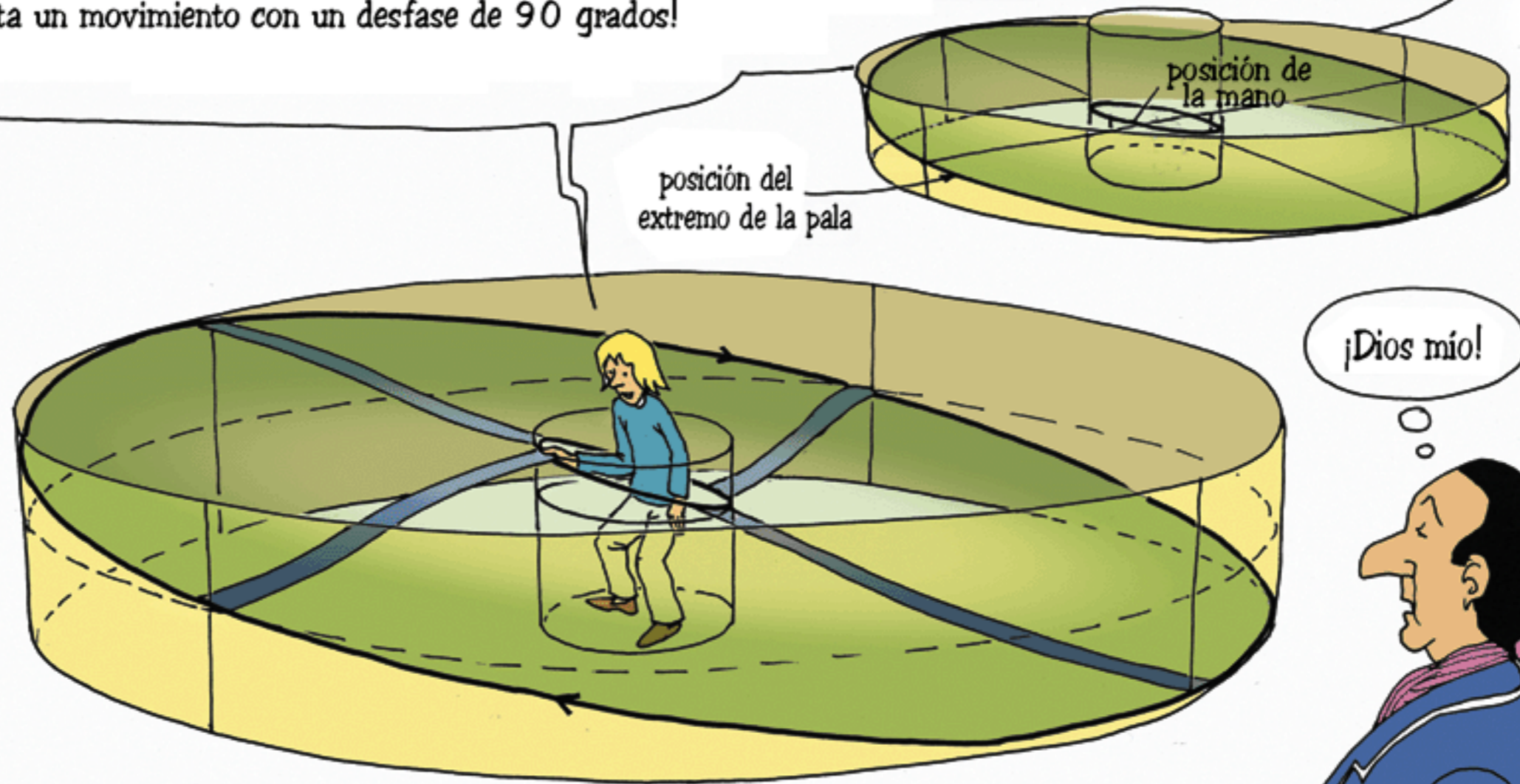
Ahora es cuando nos damos cuenta que la mecánica de un helicóptero es mucho más compleja que la de un avión

Toda esa ciencia y toda esa técnica para terminar en este fenómeno idiota que no comprendo

Vueltas, vueltas...

No hay efecto posible sin causa. Tengo que descubrir la razón suficiente de todo esto

Creo que he comprendido, Pangloss. Cuando doy vueltas a esta pala de arriba a abajo, girando sobre mí mismo y arreglándomelas para que el periodo de oscilación que le impongo sea el mismo que mi periodo de rotación, debido a la combinación de su inercia y de su elasticidad, ¡resulta un movimiento con un desfase de 90 grados!



¡Dios mío!

En términos eruditos, eso traduce el comportamiento de un **SISTEMA DE SEGUNDO ORDEN**

Esa razón suficiente, lo admito,  
parece estar más allá de mi entendimiento

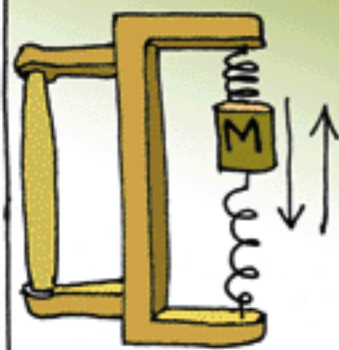
No le busquen la utilidad práctica  
a este aparato pues su única función  
es explicar el particular comportamiento  
de las palas de los helicópteros

Vas a comprenderla, maestro,  
gracias a este aparato  
denominado **ELASTOTRÓN**

Creía que estábamos en la mecánica de fluidos

Explico: si saco la masa **M** de su posición  
de equilibrio, va a oscilar con un  
determinado periodo al que llamamos  
**PERIODO PROPIO DEL SISTEMA**

Si cojo el aparato y lo sacudo de arriba hacia abajo con el  
mismo periodo **T**, la masa **M** va a "responder" a **DESTIEMPO**



T



¿Y qué te importa a ti  
la mecánica de fluidos?

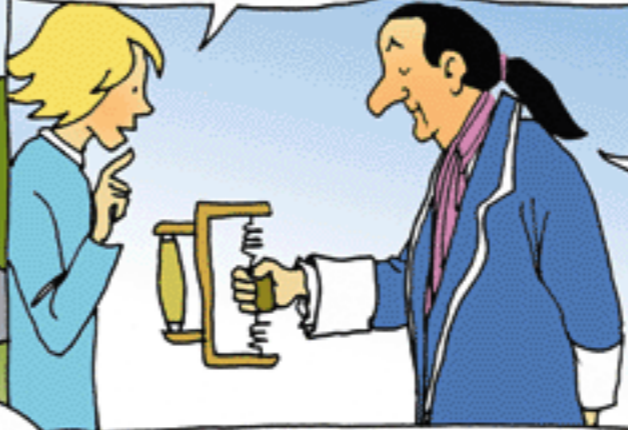
¡Estoy seguro de que debes nadar como un tonto!

¿Nadar?



Déjalo, querido. No nos vamos a poner ahora a discutir con un pingüino. ¡La historia ya está bastante complicada!

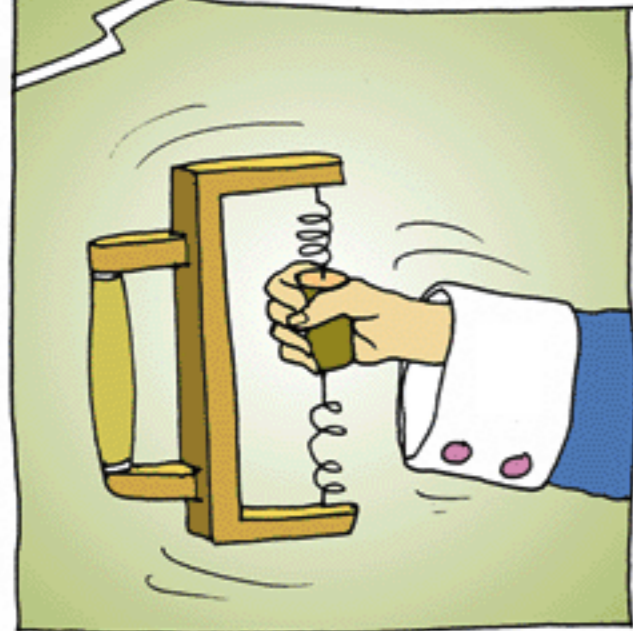
Toma el Elastotrón por su masa y sacúdelo según su periodo propio  $T$



Bien, lo agarro así y lo sacudo según su... periodo propio

La estructura responde también a **DESTIEMPO**

Traslademos esta teoría al helicóptero. Antes yo agitaba las palas **EN FASE** con mi movimiento de rotación sobre mí mismo. En vuelo, son las palas las que "sacuden" la máquina. De ahí la necesidad de colocar en cada una una **ARTICULACIÓN DE BATIMIENTO**



Hmm, ya veo.



(\*) En sus primeros ensayos con el **AUTOGIRO**, el español DE LA CIERVA tuvo que introducir muy pronto este sistema de "palas articuladas más amortiguadores" so pena de ver romperse su rotor.



Me pregunto qué estará haciendo Cándido. Ya hace bastante tiempo que no tenemos noticias de él. Eso me inquieta

Te preguntas por lo que habrá podido inventar

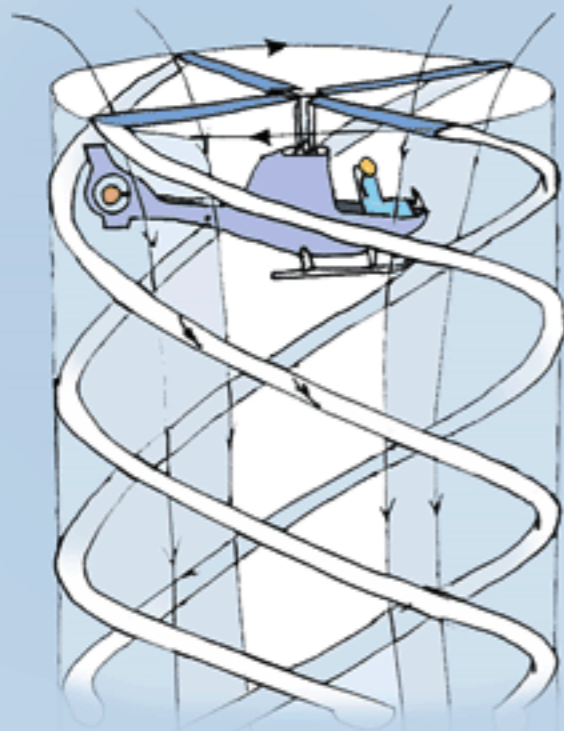
Ese muchacho nunca ha simpatizado con ideas subversivas

Y además es un buen ingeniero

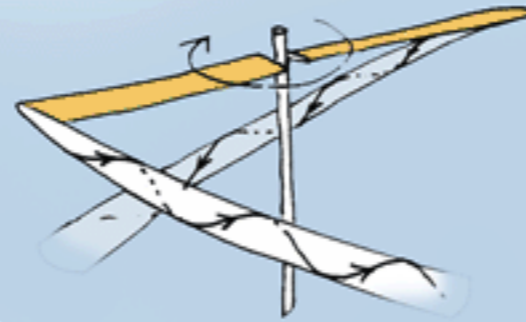
Pero no me gustan para nada sus ideas acerca de... los viajes interestelares

De cualquier forma, mi hija jamás se casará con un plebeyo, aunque sea doctor en ciencias

# TRANSICIÓN



Esta turbulencia inútil representa una pérdida de energía



Las palas del helicóptero son alas de gran longitud que dejan en su estela **TORBELLINOS MARGINALES**.

Son estos torbellinos que se crean en el extremo de las alas los que provocan a gran altitud condensaciones de vapor de agua (líneas de condensación).

A medida que el helicóptero se desplaza, la forma del flujo se ve completamente modificada. Los torbellinos pierden su importancia y, debido a ello, la máquina puede sostenerse a expensas de un menor gasto de energía.

## La Dirección



pájaro en vuelo estacionario:  
fuerte turbulencia



pájaro en translación

Reconozco que no entiendo nada sobre esta historia de la **TRANSICIÓN**



Es muy sencillo.  
Observa cómo despegamos



Para mantenerse estacionario se gasta energía creando la turbulencia

Al desplazarnos, el aire fluye entre las plumas con menor turbulencia. También desplazamos aire hacia abajo, pero gastando ahora menos energía



¿Y en la transición inversa?



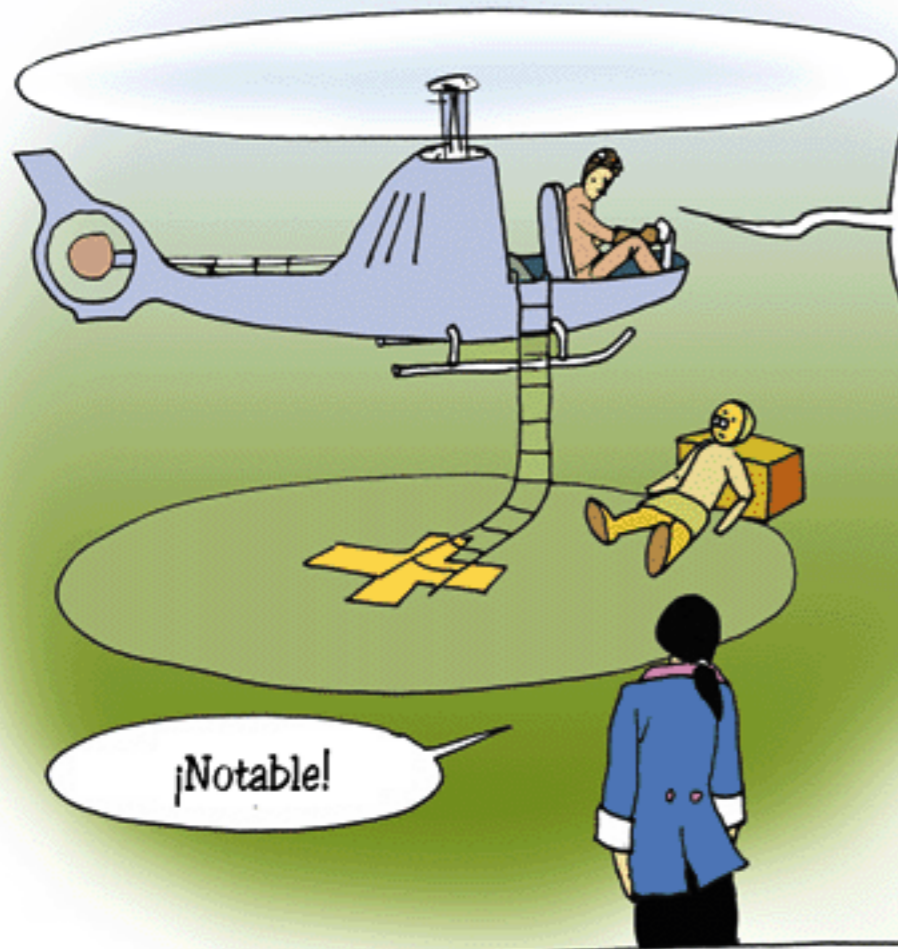
Nada raro. Puedes ver allá  
abajo algo interesante, un pez...



Luego te inclinas para anular  
tu velocidad e inmovilizarte en el aire



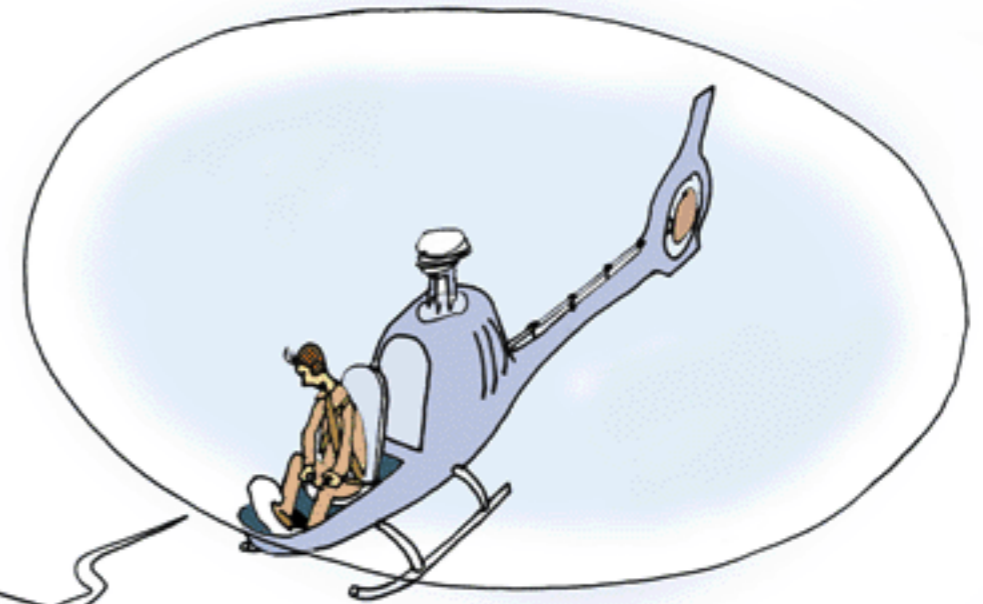
Y ahora adquieres un régimen de vuelo estacionario,  
creando una fuerte turbulencia y por lo tanto gastando más energía




¡Notable!

Ahora sí está todo listo, Pangloss.  
La máquina es extraordinariamente estable y maniobrable.  
Una vez que Cunegunda haya subido, despegaré lo más rápido posible para ponernos fuera del alcance de los arqueros del barón


Sólo tengo que acercarme desde bien alto, pues la gente nunca mira hacia arriba lo que sucede en el aire, y después descender a la terraza a toda marcha






Uh lá lá,  
es completamente inestable

¡Y además  
vibra!



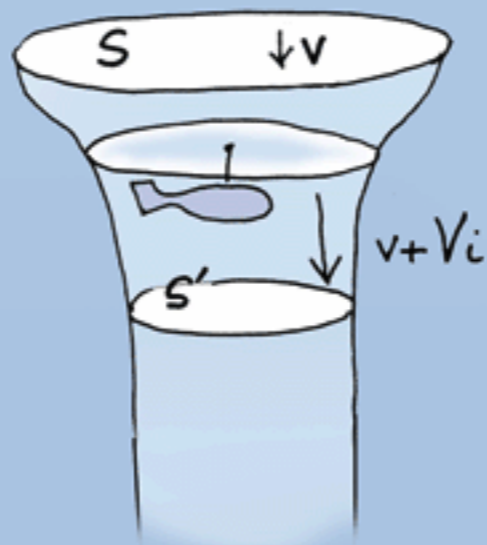
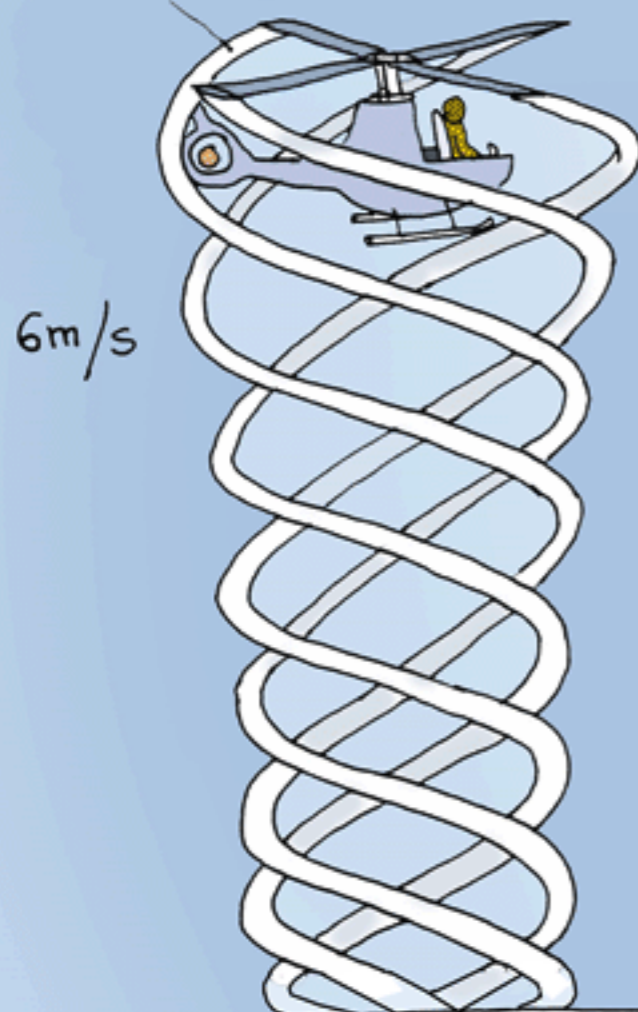
Tengo la sensación de que mi helicóptero se  
apoya sobre una especie de masa amorfa,  
completamente inestable. Tengo que salir de ella  
lo más pronto posible. ¡Decididamente, el  
descenso vertical rápido no es para nada bueno!



Erré el blanco, Pangloss.  
El acercamiento completamente vertical no funciona

# VELOCIDAD INDUCIDA

torbellinos en los extremos de las palas



$$\rho v S = \rho (v + V_i) S' (*)$$

El hecho de que un helicóptero se suspenda "desplazando el aire hacia abajo" implica comunicarle a éste una **VELOCIDAD INDUCIDA**  $V_i$  que es del orden de 6 metros por segundo. Expulsando humo por los extremos de las palas podremos ver materializado este fenómeno

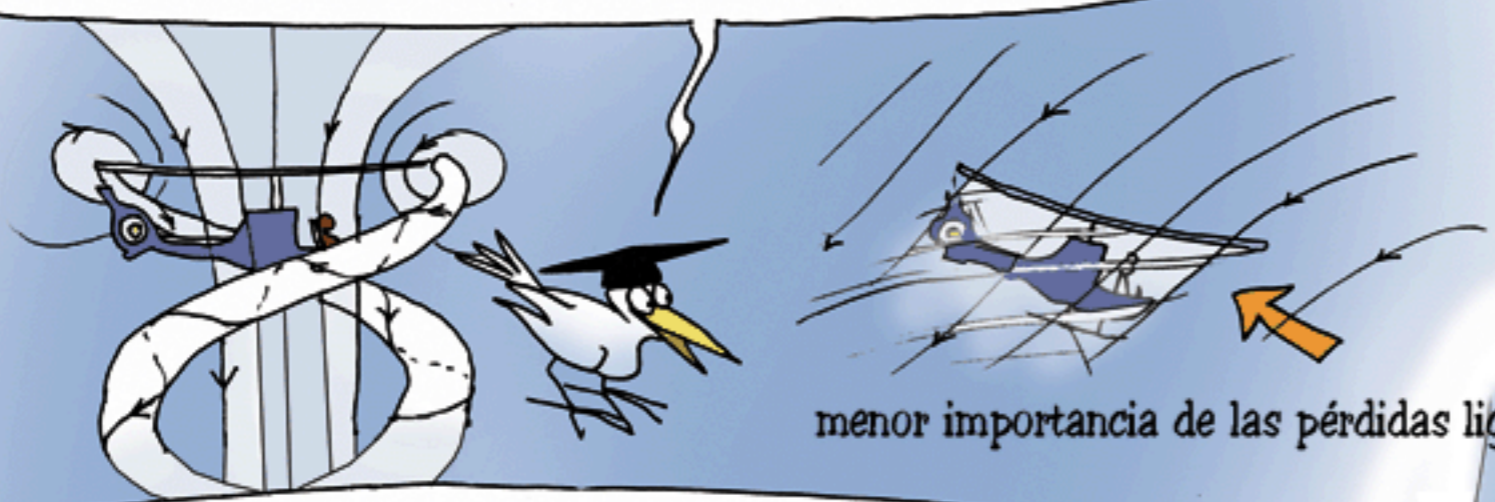


torbellino marginal

También un avión vuela "desplazando el aire hacia abajo", aunque el efecto de velocidad inducida es menos evidente

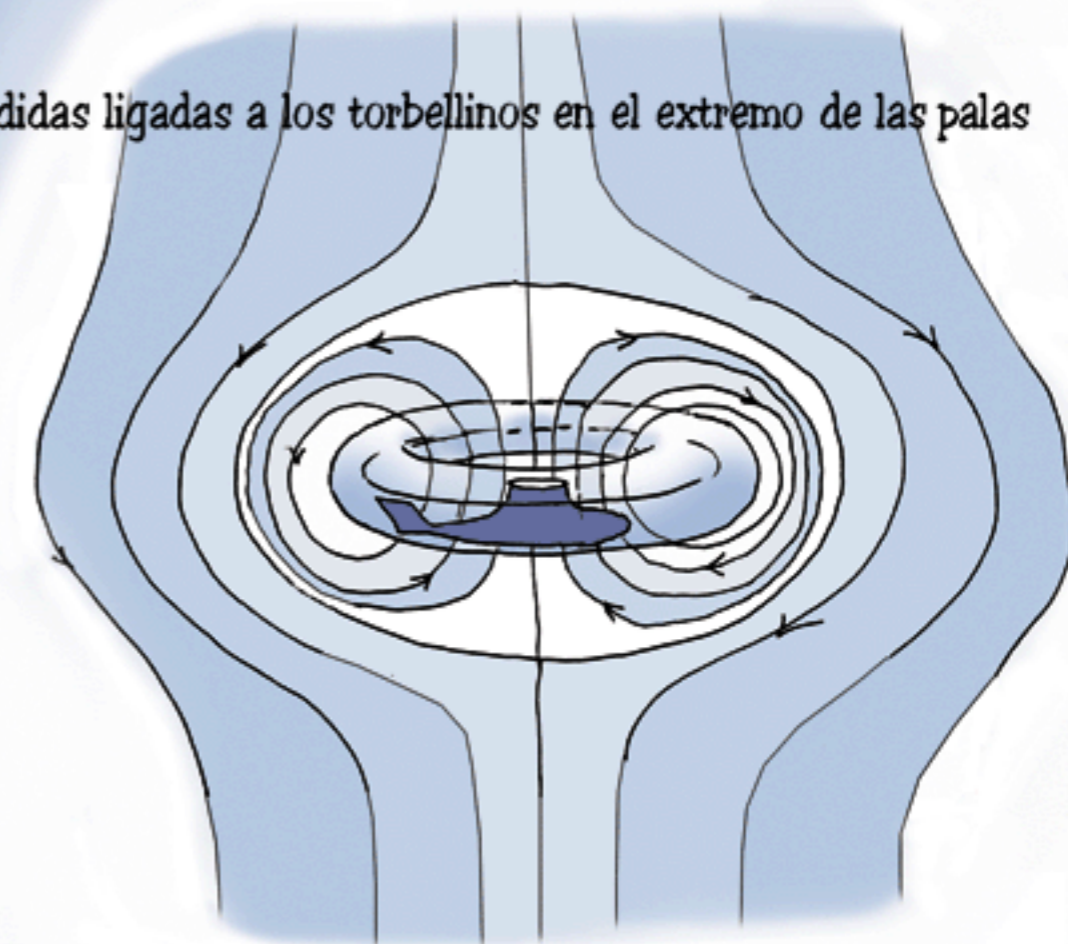
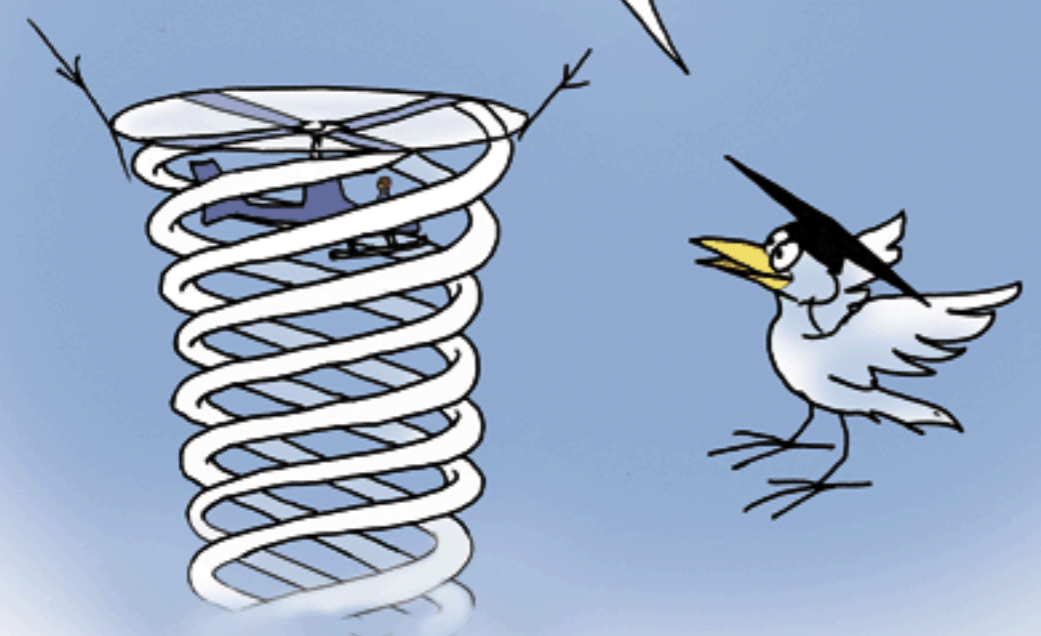
(\*) Esta relación expresa la conservación de un flujo de aire de densidad volumétrica  $\rho$  constante, e implica que la sección  $S'$  es menor que la sección  $S$ .

Todo aquello que sea **COMO TORBELLINO** representa una pérdida de energía. El vuelo de translación contrarresta la aparición del régimen turbulento. Por lo tanto, esta manera de mantenerse a altitud constante consume menos energía



menor importancia de las pérdidas ligadas a los torbellinos en el extremo de las palas

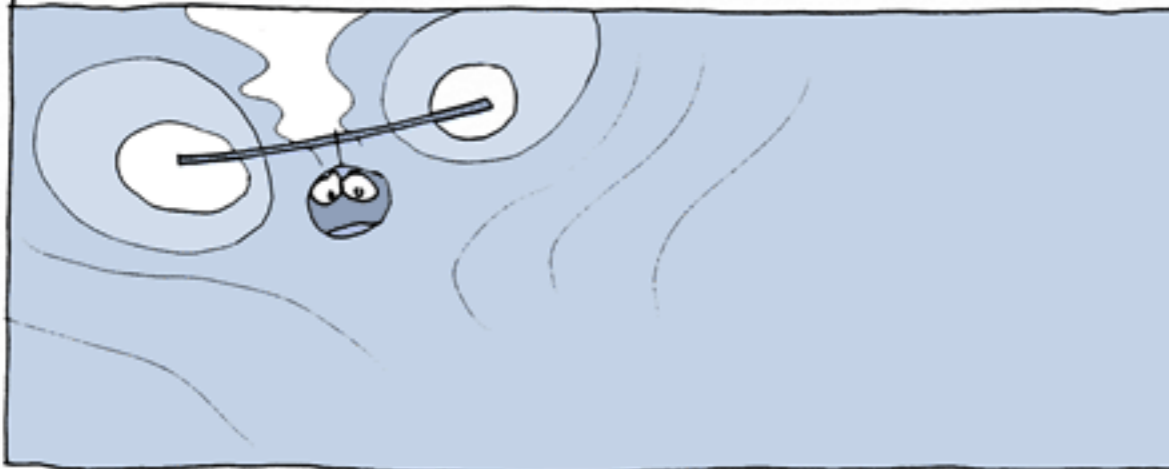
Cuando el helicóptero intenta un descenso vertical, los torbellinos marginales interactúan cuando la velocidad vertical supera  $\frac{1}{4} V_i$



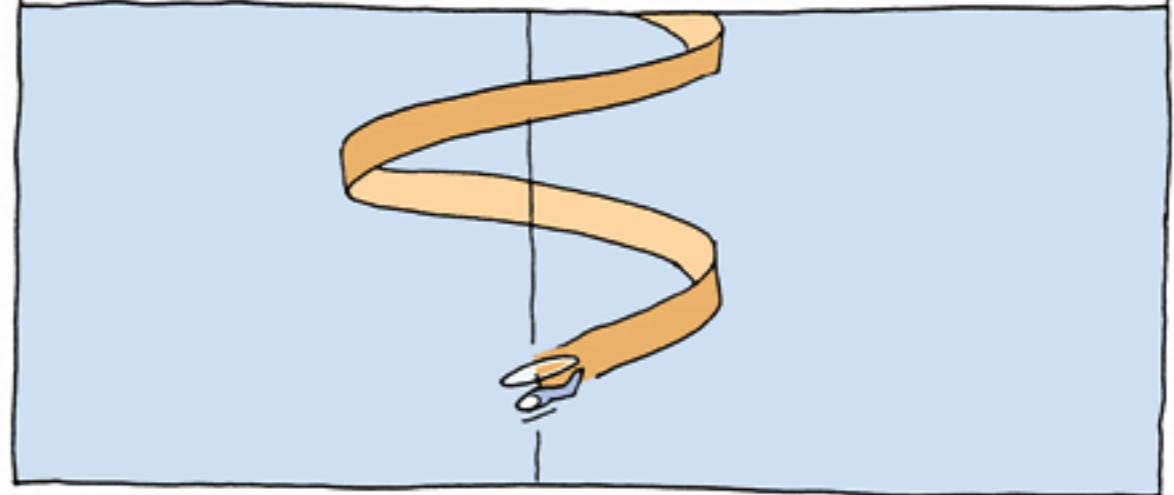
Cuando la velocidad de descenso alcanza los tres cuartos de la velocidad inducida  $V_i$ , los torbellinos se mezclan y dan origen a un gran **VÓRTICE** de forma tórica.



Cada pala toma con retraso el torbellino marginal creado por la pala precedente y lo amplifica, acrecentando las pérdidas. Además, esta geometría aerodinámica es muy inestable



Así, para descender sobre un lugar de aterrizaje los pilotos prefieren adoptar un acercamiento en espiral, conservando un régimen de translación



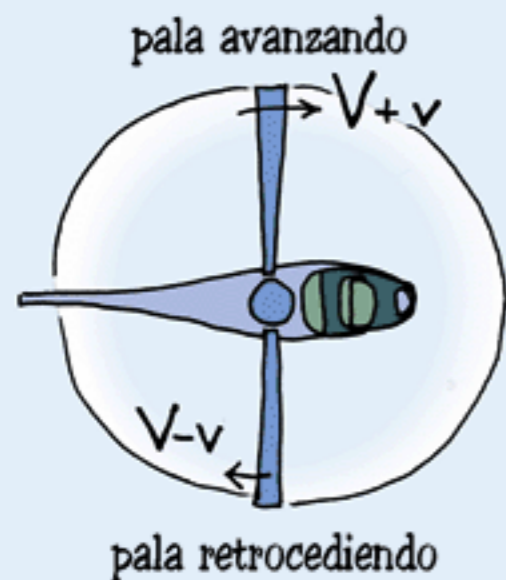
Moraleja: me acercaré a lo alto de la torre en un vuelo horizontal. Reduciré mi velocidad a lo último, pasando a un vuelo estacionario y efectuando un último descenso con una velocidad vertical moderada, digamos de un metro por segundo



para evitar el peligroso paso a un **RÉGIMEN TURBULENTO**

Volvamos ahora a nuestros ensayos de vuelo

# DESCOLGADA CON PALA RECOLANTE



Sea  $V$  la velocidad de la pala en su periferia, y  $v$  la velocidad de vuelo del helicóptero. El **VIENTO RELATIVO** al que se encuentra sometida la **PALA QUE AVANZA** es  $V+v$ . Y aquél al que está sometida la **PALA QUE RETROCEDE** es  $V-v$ . Las fuerzas de presión que se ejercen sobre las dos palas son, por lo tanto, diferentes.



Se estaría tentado a pensar que, a gran velocidad, el helicóptero presentaría tendencia a balancearse de costado. Pero debido al retraso de  $90^\circ$  en la "respuesta" del aparato, ésta tiende a hacerlo encabritar

El sentido de giro de los rotores difiere de acuerdo al país. Así, en los helicópteros franceses la pala que avanza está a la izquierda, mientras que en las máquinas norteamericanas está a la derecha. Pero ese detalle no cambia en nada lo dicho aquí.

*La Dirección*

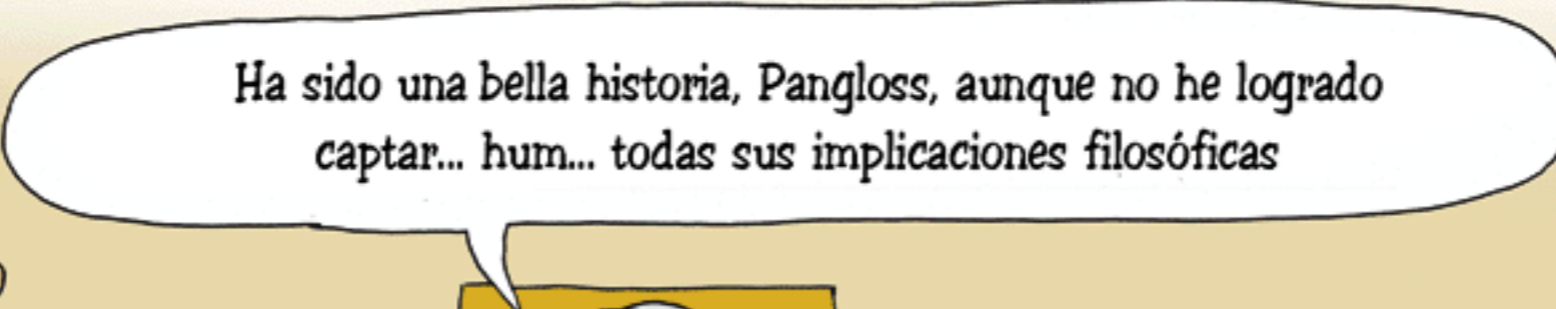
Cándido, estaba pensando en esto:  
El barón ignora todos tus proyectos, pero la señorita Cunegunda también. ¿Quién te asegura que ella va a estar en la terraza de la torre cuando llegues volando allá?



... entonces el príncipe, a la hora en que tocaban las doce de la medianoche en la plaza del reloj, se montó en su alfombra voladora y fue a liberar a la princesa, que lo esperaba en lo alto de la torre más alta de su castillo



Ha sido una bella historia, Pangloss, aunque no he logrado captar... hum... todas sus implicaciones filosóficas



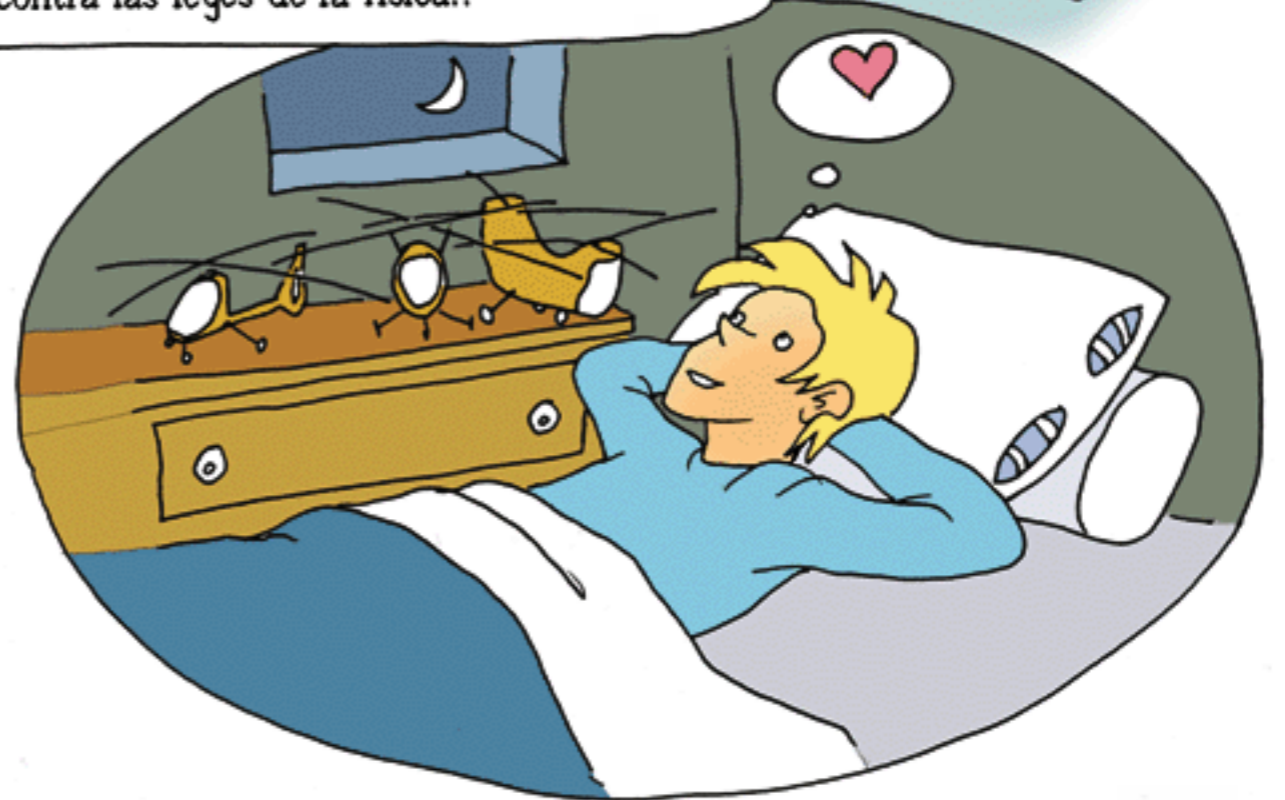


Historias como esa sólo existen en los cuentos de hadas. ¡Sólo nos falta ahora creer en papá Noel!



Ese Pangloss tiene a veces su lado soñador

¡Figúrate, príncipes que viajan en alfombras voladoras!  
¡¡Eso va contra las leyes de la física!!



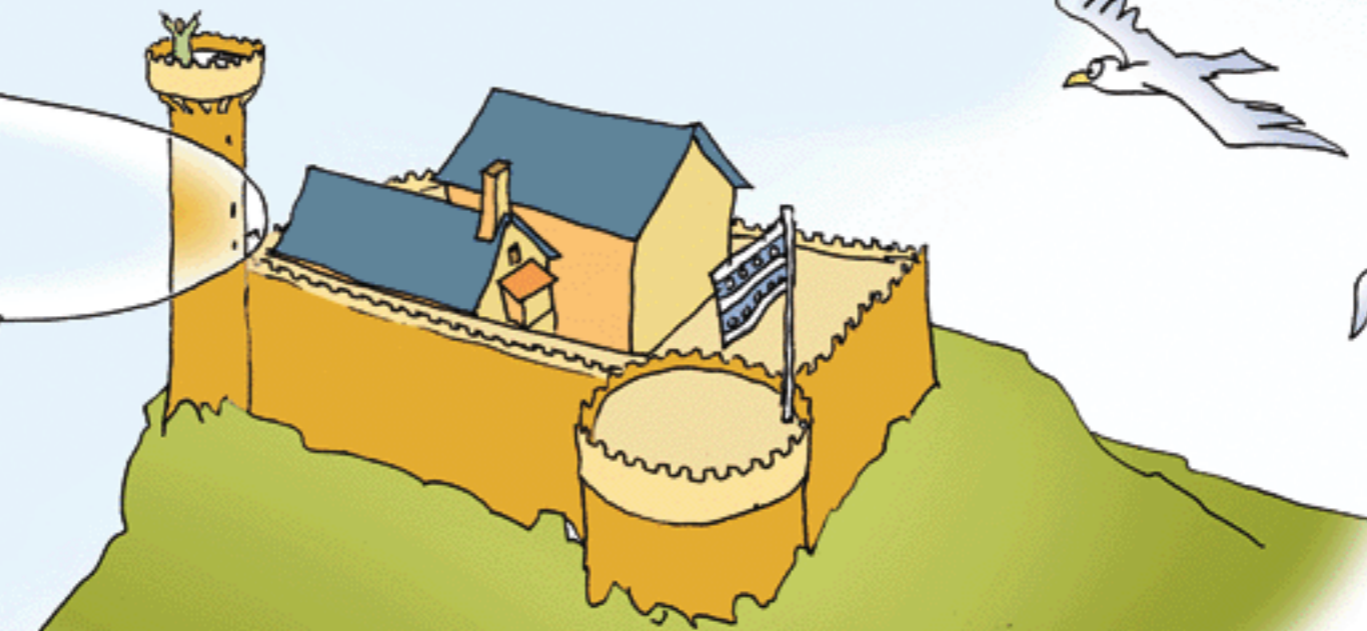


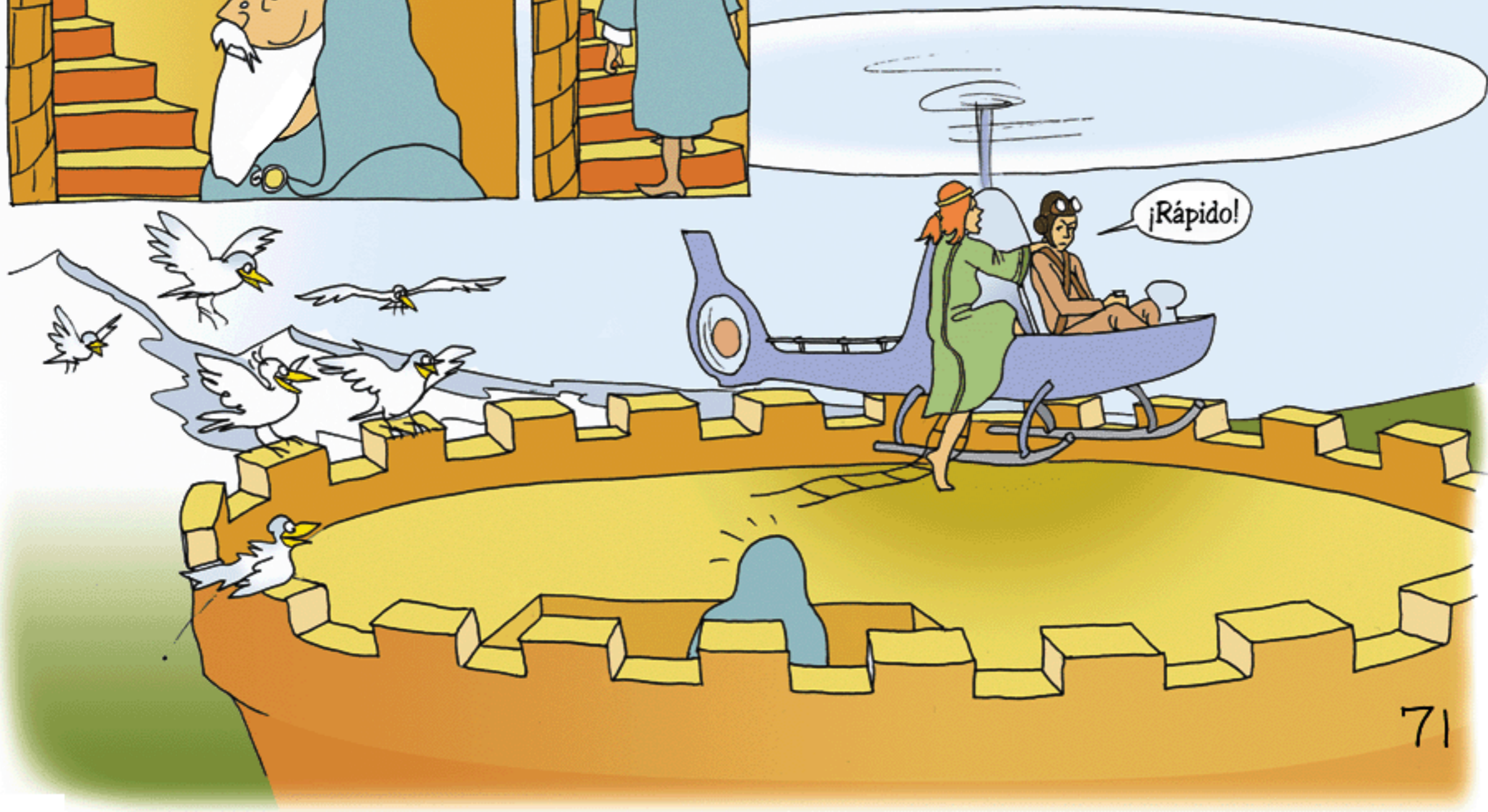
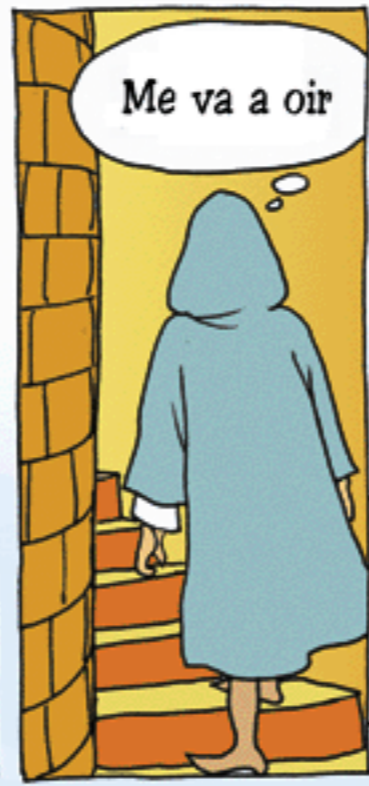
Despegue en cinco minutos. Puedes calentar el motor



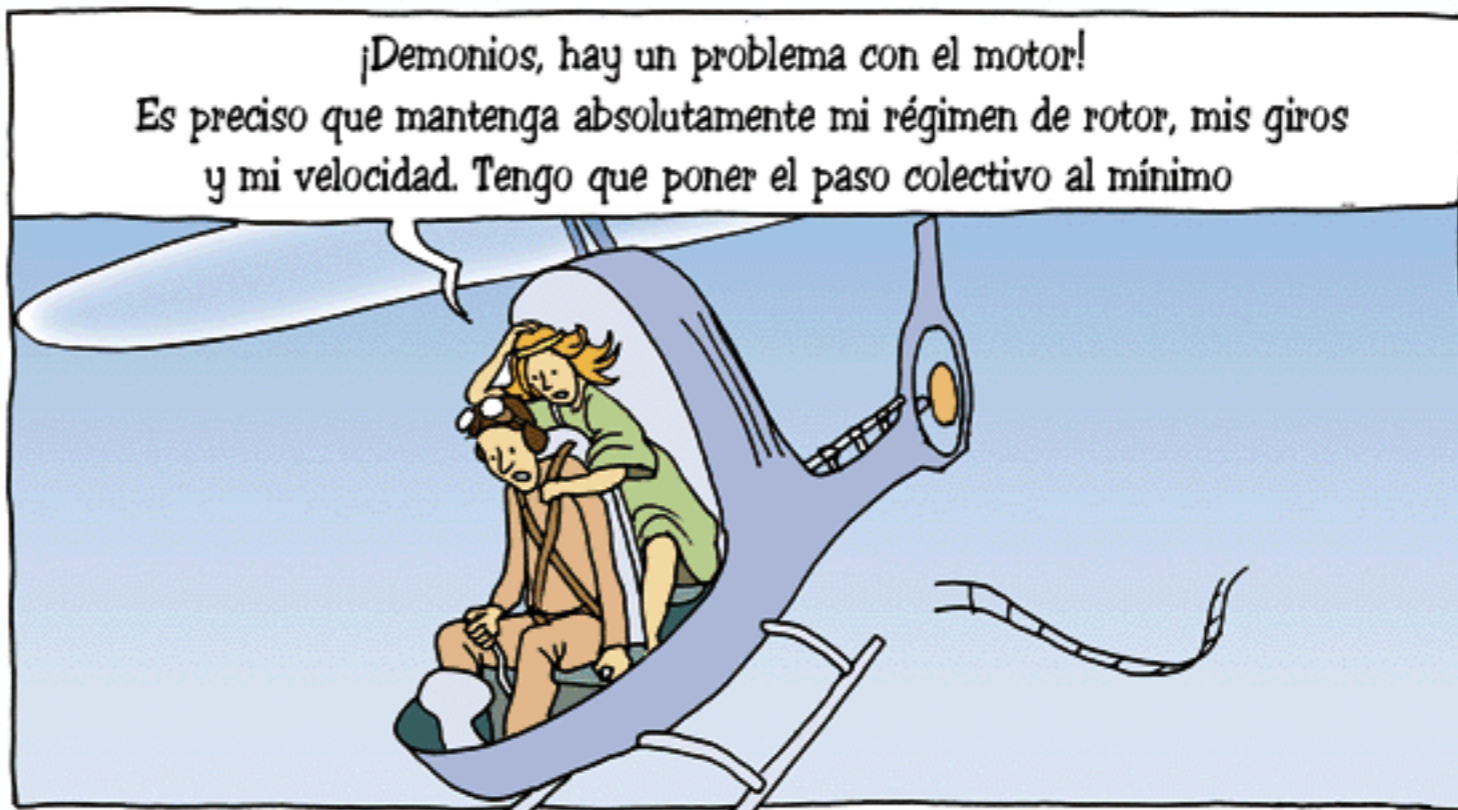
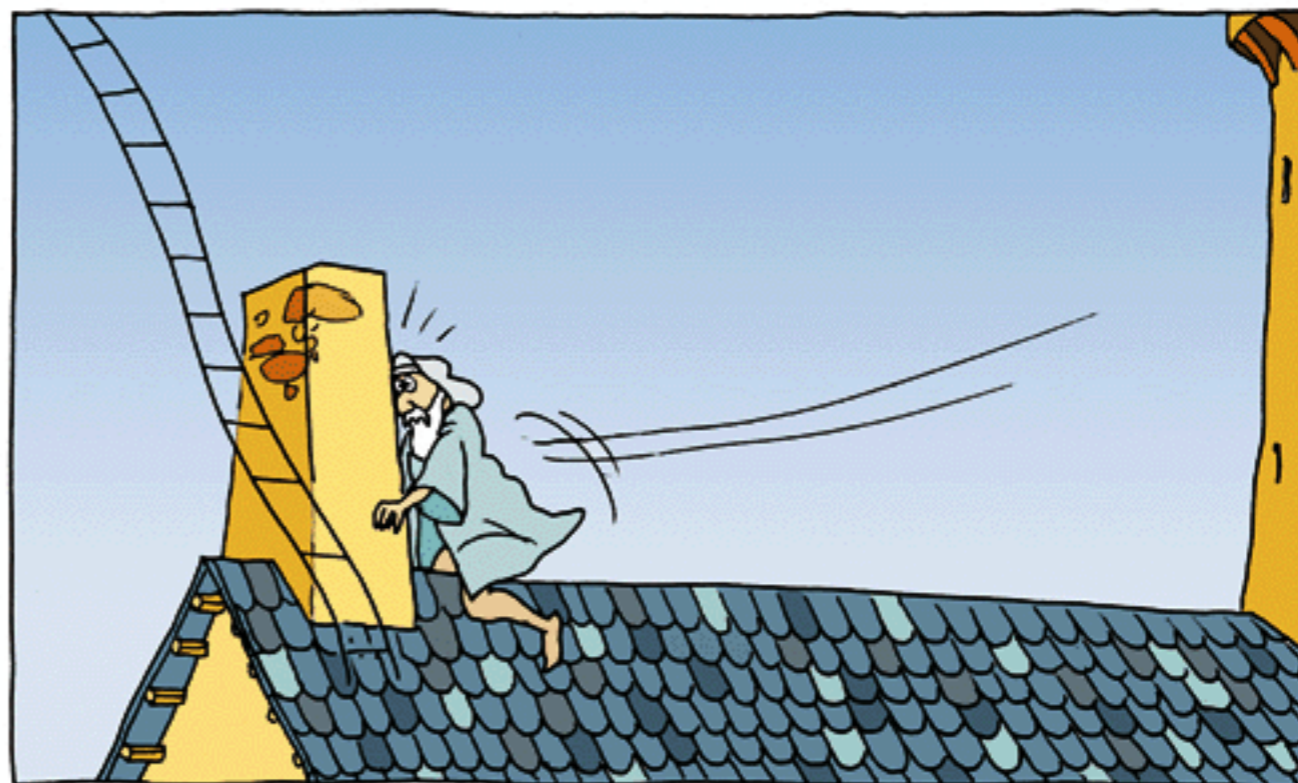
Pangloss dijo a medianoche. El reloj comienza a sonar, tengo que subir a la torre

¡¡¡Ahí está!!!











Muy bien, ahora el aire está en flujo inverso, pasando de abajo hacia arriba. Hemos cambiado a un régimen de **AUTORROTACIÓN**. Mi helicóptero se ha transformado en autogiro. La parte motriz y autogiratoria del rotor arrastra al resto



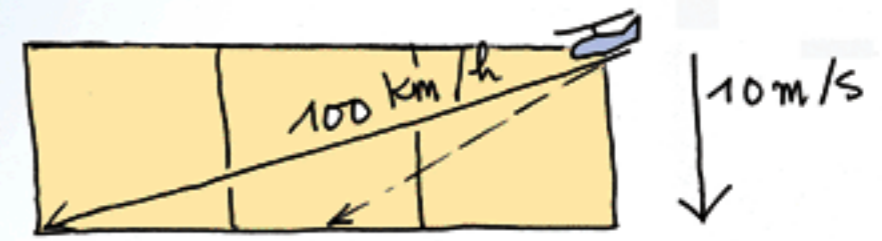
¿Entonces un helicóptero puede... planear?

¿Tú crees?

Descendemos bastante rápido, a unos 10 metros por segundo. Tanto como una piedra, aunque aún estamos lejos

En régimen de autorrotación, un helicóptero a una velocidad de 100 km/h corresponde a una **FINEZA** de 3. En autorrotación vertical la velocidad de caída sería de 20 m/s, y un impacto a esa velocidad acabaría con los tripulantes. Para fijar ideas, un ser humano puede encajar un impacto a 5 m/s, lo que equivale a saltar desde un armario (\*). Un impacto a 10 m/s corresponde a un salto desde una altura de 5 metros.

*La Dirección*

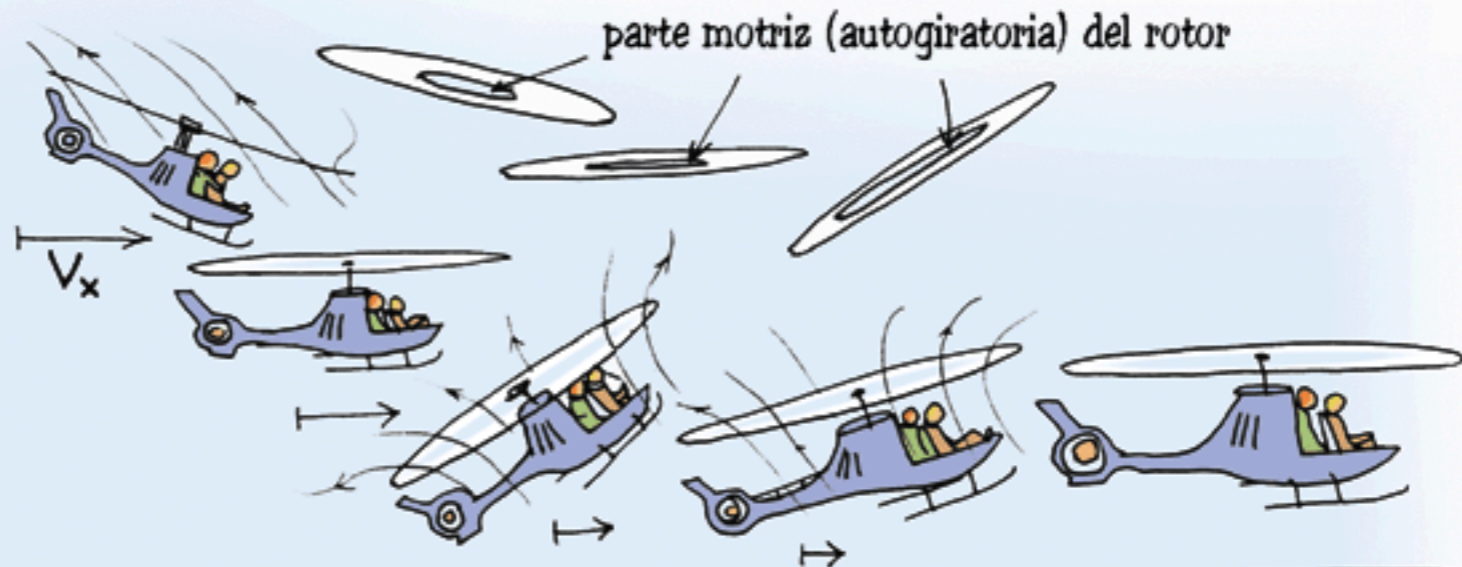
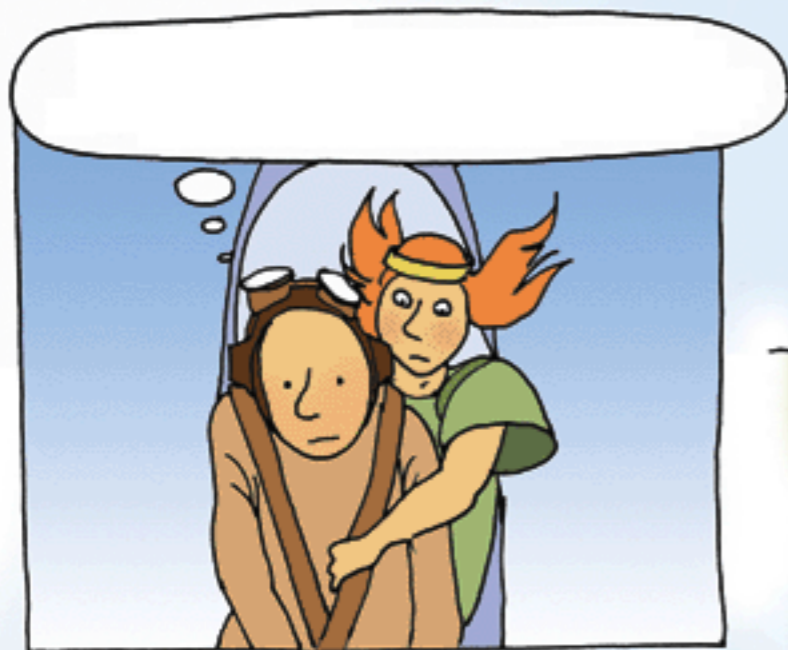


impacto a 5 m/s

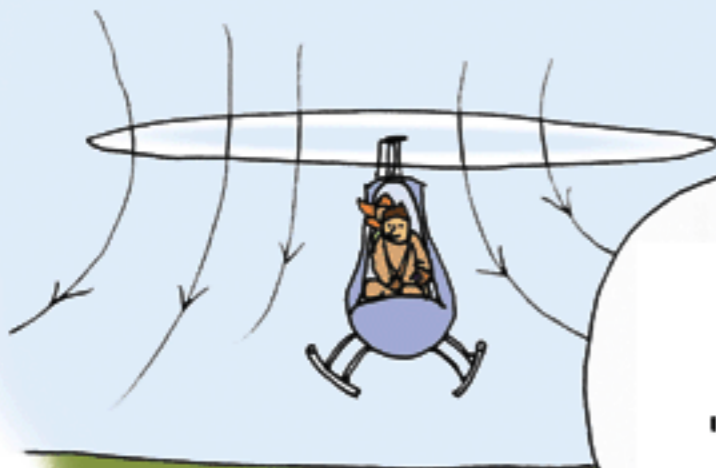


$$(*) V_{(m/s)} = \sqrt{2gz} = \sqrt{20z} \text{ (metros)}$$

# EL TOQUE FINAL (\*)



A diez metros de altura, Cándido tira decididamente de su mando manteniendo el paso colectivo al mínimo. La máquina se encabrita y las palas son enfrentadas por una incidencia de viento relativo mayor que aumenta la parte del rotor que es "motriz" y autogiratoria. De esta forma convierte la energía cinética de translación  $\frac{1}{2} M V_x^2$  en  $\frac{1}{2} M V_x^2$  energía de rotación. Después empuja nuevamente el mando.



Ahora tira de la palanca de paso colectivo. El flujo de aire se invierte. El rotor pasa entonces del régimen de "autogiro" al régimen de "helicóptero". Aprovechando el efecto suelo utiliza la energía cinética almacenada por el rotor (\*\*)



(\*) Maniobra de frenado conocida en inglés y en francés como "flare" (NdT).

(\*\*) En esta maniobra, el consumo de adrenalina es muy elevado.



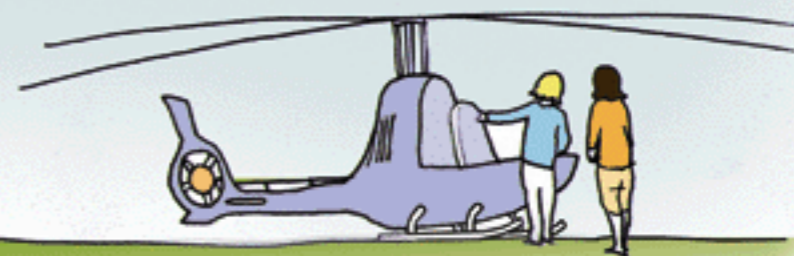
Que barón más fastidioso.  
Es la primera vez que aparece algo  
divertido, y él quiere poner prisionero a  
su inventor. Vamos a arreglar esto.  
Plissoneau, pásadme mi espada, os lo ruego



De rodillas, jovencito. Voy a nombrarte  
marqués de Helicolandia.  
Y serás desde ahora  
mi ministro de  
transportes de todos  
los tipos

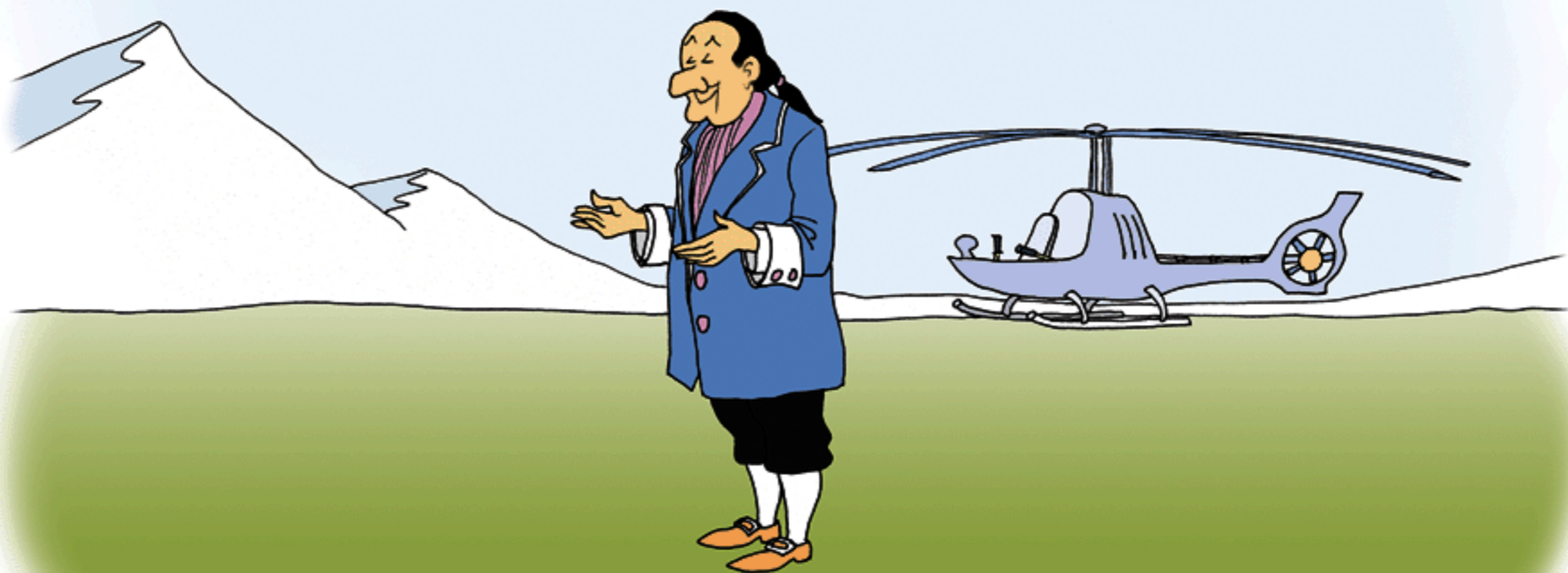


Já, marqués, eso es mejor aún  
que barón. Entonces, padre, ahora  
nos puedes dejar en paz



**FIN** 76

Ya lo ves entonces, mi querido Cándido, que todo apunta a lo mejor en el mejor de los mundos posibles. Así pues, si no hubieras sido echado a patadas en el trasero por la puerta del castillo por el barón, no habrías inventado el helicóptero



Un gran agradecimiento a Pascal Chrétien por sus preciosos consejos técnicos.