

# Física y bicicleta

Luis María Agustín González Méndez  
I.E.S. "Albarregas" de Mérida (Badajoz)



# Índice

<b>Introducción</b>	269
<b>Objetivos</b>	271
Objetivos generales	271
Objetivos específicos	271
<b>Contenidos</b>	272
<b>Metodología</b>	274
<b>Organización de las fases. Períodos de realización</b>	276
<b>Desarrollo de la actividad</b>	277
<b>Criterios y procedimientos de evaluación</b>	278
<b>Posibilidades de prolongación de la actividad</b>	280
<b>Anexo</b>	281



## Introducción

Una exigencia inequívoca de todo docente es la constante búsqueda de nuevos y eficaces recursos pedagógicos. Esta búsqueda tiene como finalidad afrontar los retos que la sociedad actual exige, y supone una apuesta continua por métodos de enseñanza alternativos que conecten con los intereses y actitudes de los alumnos, abocados a desenvolverse en un mundo cambiante. De ahí que a los profesionales de la enseñanza se nos exija explorar de continuo nuevas estrategias de motivación, que animen y faciliten la formación de los alumnos, y que se enmarquen dentro de lo que se ha convenido en llamar la nueva pedagogía educativa, en la que el Aprendizaje significativo debe desempeñar un gran protagonismo. Esta propuesta didáctica se desarrolla en este contexto, y quiere venir a cubrir algunas lagunas que inexorablemente los actuales currícula no pueden pretender abarcar, tanto por los ajustados márgenes en los que se desenvuelven, como por la amplitud y diversidad de los aspectos que afrontan.

Con no poca frecuencia la enseñanza de la Física en el Bachillerato se ve privada de uno de sus aspectos más esenciales: su carácter experimental. No es lugar aquí de analizar las causas de este escollo, muchas veces de difícil solución, pero la realidad es que un gran porcentaje de alumnos de Bachillerato salen de nuestros Institutos sin haber realizado prácticas de Física. Bien es cierto que en primer curso pueden tener la suerte de estar en un centro donde se realicen desdobles de clase para asistir a los Laboratorios, pero en ocasiones esos desdobles no pueden realizarse, e incluso en el caso que se realicen, lo más probable es que asistan a prácticas de Química, que exigen un material menos sofisticado y más al uso en la mayoría de los centros. En 2º de Bachillerato sencillamente no hay prácticas de Física, pues ni están previstas, ni “entran en selectividad”, ni lo permiten los apretados programas. Nos convertimos así a la fuerza en cómplices de -permítaseme la expresión- una aberración tan notoria como la de privar de su carácter experimental a una disciplina como la Física.

El presente trabajo trata de aportar un material curricular novedoso que permite que se realicen Prácticas de Física contando sencillamente con una bicicleta. El alumno podrá por tanto realizarlas en su propia casa, o en cualquier lugar que desee, y el profesor podrá ilustrar un buen número de experiencias prácticas sobre los principales contenidos de la Física de Bachillerato, sin necesidad de preparar ningún tipo de material, contando única y exclusivamente con una bicicleta. En concreto se indican en este trabajo 20 propuestas

didácticas sobre Física que abarcan los principales temas que se tratan en Bachillerato: estática, cinemática de la traslación, cinemática de la rotación, dinámica de la traslación y de la rotación, trabajo, potencia, energía, electromagnetismo, etc. El hecho de que todo se haga con una bicicleta, conecta directamente con los intereses de los alumnos, y hace que la Física les sea más familiar y cercana. Podrán comprobar además que todas esas leyes aparentemente abstractas y etéreas, son la base y la explicación del funcionamiento de algo que para ellos es tan familiar como su bicicleta. La motivación por tanto está asegurada.

Pero además este trabajo nace con la vocación de paliar en parte la escasa -por no decir nula- bibliografía sobre el tema. En efecto, en castellano existe solamente un trabajo de principios de los 60 (referenciado en la bibliografía), que trata el tema con un enfoque totalmente diferente, tanto en su contenido como en sus aspectos formales, y que evidentemente difiere sustancialmente de este que ahora presentamos. Se trata de la monografía del Profesor Sánchez Real, de la Universidad de Valencia. En otros idiomas existen artículos científicos, muy especializados, que por su carácter tratan monográficamente algún aspecto parcial, muy lejos de las pretensiones de este trabajo. Todos ellos se citan en la bibliografía.

Por último señalar que la presente monografía puede aportar un buen recurso pedagógico en escenarios docentes precarios, tales como Centros de Enseñanza no suficientemente dotados, países del Tercer Mundo, etc. donde muchas veces la imaginación debe hacer frente a condiciones ciertamente adversas, y donde si faltan laboratorios, de seguro que abundan las bicicletas. También pensé que podría utilizarse como un recurso didáctico más en la enseñanza escolar de la Física, y que de aquí podría salir también un buen Taller de actividades formativas en torno a la bicicleta para cursos de verano, campamentos, etc. Sirvan estas consideraciones como justificación del interés del trabajo que nos ocupa.

## Objetivos

### Objetivos Generales

- Investigar una forma novedosa de enseñar y aprender las leyes de la Física.
- Elaborar materiales para la mejora de la docencia no universitaria de la Física.
- Potenciar el trabajo en grupo y la investigación entre los alumnos, desde una perspectiva y método tutorial.
- Facilitar a los alumnos que comprendan la interrelación entre Ciencia-Tecnología-Sociedad.
- Fomentar el uso de la bicicleta en la sociedad, como hábito saludable que ayuda al desarrollo personal y a la mejora de la calidad de vida.
- Ofrecer un recurso didáctico que supla la carencia de Laboratorios en escenarios docentes precarios: países del Tercer Mundo, etc.

### Objetivos Específicos

- Mostrar el aprovechamiento didáctico de la bicicleta en la enseñanza de la Física.
- Estudiar las principales leyes físicas que rigen el funcionamiento de la bicicleta.
- Elaborar guiones de Prácticas de Laboratorio de Física que se pueden realizar con una bicicleta: estática, cinemática, dinámica, electricidad, magnetismo, etc.
- Paliar la carencia de prácticas de Física en 2º de Bachillerato.
- Hacer de la bicicleta un laboratorio experimental de Física completo, didáctico y asequible.

## Contenidos

1. Diseños de “bicicletas extremeñas”.
2. Aprovechamiento didáctico de la bicicleta.
3. La bicicleta de **Leonardo da Vinci**.
4. Aprendizaje por descubrimiento.
5. Cinemática de la traslación y de la rotación.
6. Fuerzas motrices y contramotrices.
7. Equilibrio estático.
8. Equilibrio dinámico.
9. Fuerza centrífuga.
10. El avance y la estabilidad.
11. Movimiento giroscópico.
12. Bicicletas inestables.
13. Conservación del Momento angular.
14. Equilibrios “imposibles”.
15. Centro de gravedad de la bicicleta.
16. Centro de masas del ciclista.
17. Estudio del peralte.

18. Desarrollo de una bicicleta.
19. Ecuación Fundamental de la dinámica de la traslación.
20. Ecuación Fundamental de la dinámica de la rotación.
21. Rozamiento mecánico.
22. Rozamiento aerodinámico.
23. Potencia desarrollada en pendientes.
24. Potencia total desarrollada en la bicicleta.
25. Ley de Faraday-Henry. Ley de Lenz.
26. Breve cronología de la Historia de la bicicleta.
27. Bibliografía general.
28. Bibliografía especializada.
29. Recursos enmarcados dentro de las nuevas tecnologías.
30. La bicicleta en Internet.
31. Hábitos saludables.
32. La cultura de la bicicleta.

## Metodología

El Proyecto se inscribe dentro de la nueva pedagogía al uso, en el que el Modelo Enseñanza-Aprendizaje se enmarca dentro del Aprendizaje significativo. Es decir, partimos del hecho de que el alumno es el que construye su propio aprendizaje, y el profesor es el facilitador de esa tarea de construcción, de tal manera que las ideas previas o preconcepciones del alumno sean el punto de partida de su proceso cognitivo. Dentro de esta concepción constructivista, hemos querido resaltar el protagonismo que debe tener el alumno en su propio aprendizaje, enfatizando lo que los pedagogos modernos designan como Aprendizaje por descubrimiento. En este sentido, en todas las propuestas didácticas que se realizan, se procura sorprender al alumno, con experimentos estrella, de tal suerte que al descubrir esa idea principal, que en ocasiones contrasta con lo que debería ocurrir por sentido común, se produzca en la mente del alumno un choque entre sus ideas previas y los resultados de la práctica. Esta aparente contradicción o paradoja, será el revulsivo que haga que el alumno reorganice su pensamiento con lo nuevo aprehendido.

Las 20 propuestas didácticas que se proponen son realizables por los alumnos, aún sin la tutela del profesor. Todas ellas tienen una explicación sencilla, y de intento hemos huido del excesivo formalismo matemático, que en ocasiones enmascara la idea principal que se intenta transmitir. Se trata pues de una Metodología Activa, que tiene como principal protagonista al propio alumno. De hecho la exposición de las propuestas es concisa y clara, con algunas concesiones al humor que predispone a afrontarlas con gusto. La mayoría de ellas van ilustradas con gráficos o fotografías que ayudan a su comprensión. Se han desarrollado a modo de Manual, pues pensamos que es la forma idónea de redactarlas tanto para el alumno como para el profesor, y lo que es más importante, se pueden realizar en clase, en casa o en cualquier sitio, pues para ello sólo se necesita una bicicleta. Esta peculiaridad permite que se puedan poner como tareas a realizar al margen de la clase, sin que la dinámica de las mismas sufra menoscabo. Son por tanto muy versátiles y adaptables a cualquier circunstancia, que siempre quedará al arbitrio del profesor, aconsejado por las necesidades que detecte en su clase. Evidentemente se pueden realizar sistemáticamente, como un auténtico programa de Prácticas de Laboratorio. En este sentido de cada una de ellas se puede realizar un completo Guión, donde se incluya un test de preconcepciones, un debes recordar, unas lecturas previas aconsejadas, el desarrollo de la Práctica (con introducción, objetivos, material, realización), un test de evaluación, una valoración de la Práctica, bibliografía, etc. Por razones obvias esto no se ha hecho con las 20 propuestas de nuestro trabajo, pues de haber sido así, esta monografía

hubiera sido excesivamente larga, pero para ilustrar lo que decimos, hemos desarrollado ajustándonos al Guión explicitado más arriba, la primera de las propuestas, que hemos denominado **Composición de Movimientos**, y que adjuntamos como anexo a la presente Memoria. Con suma facilidad se le puede dar el mismo formato a cada una de las 20 Prácticas que se proponen.

## Organización de las fases. Períodos de realización

Hemos aludido a la versatilidad de las Propuestas didácticas que se acompañan. Ello permitirá que se adapten como un guante a la mano, en función de las necesidades docentes del grupo de alumnos, de las características del centro, y de los calendarios de evaluaciones programadas. Será el propio programa quien estipule cuándo deben realizarse cada una de ellas. Y así las de cinemática se realizarán cuando se esté impartiendo esa parte del programa, y así con todas. Dada su facilidad de realización, tanto por los materiales que se precisan, como por su desarrollo, quedará al arbitrio del profesor las que deban realizarse en clase, y las que los alumnos deben realizar en sus casas. Como pauta aconsejamos que **“las más espectaculares”** (¡Los pedales se rebelan!, Un tio vivo inesperado, Un equilibrio imposible, etc.) se pueden realizar en grupos, en la propia clase. El profesor puede alterar el orden de las mismas, adecuándolas a la secuenciación de contenidos que conste en su Programación.

## Desarrollo de la actividad

Las Prácticas que se proponen se pueden realizar bien distribuidas a lo largo del curso, en concordancia con los contenidos de las clases, bien de manera monográfica, aprovechando “el día de la bicicleta”, o “el día del centro”, o bien en actividades extraescolares, como salidas o excursiones al campo. Se pueden realizar -insistimos- en cualquier lugar o situación, e incluso pueden propiciar actividades como un “Taller de bicicletas”, o actividades veraniegas como campamentos etc. También la versatilidad atañe al hecho de poder ser realizadas individualmente por cada alumno, o en grupos reducidos. Su desarrollo no exige ni grandes espacios, (salvo algunas que han de realizarse en alguna pista no transitada), ni grandes tiempos, pues la mayoría de ellas se pueden realizar en no más de media hora.

## Criterios y procedimientos de evaluación

Por cuanto en este Proyecto intervienen tres agentes interrelacionados entre sí (Alumno-Profesor-Grupo), nos proponemos la Evaluación en estos mismos tres niveles:

### **1. El alumno evaluará:**

- Su propio aprendizaje.
- El proceso y la metodología del Proyecto.
- Su integración y participación en el grupo.
- Funcionamiento de su grupo.
- Papel asesor, director y resolutivo del Profesor.

### **2. El Profesor evaluará:**

- Al alumno.
- La consecución de los objetivos marcados.
- El proceso y la metodología del Proyecto.
- La dinámica del grupo de trabajo.

### **3. El Grupo evaluará:**

- Al profesor.
- El proceso y metodología del Proyecto.
- La dinámica del funcionamiento de los grupos.
- El interés final del trabajo.

Para ello se confeccionarán los items de evaluación necesarios, que quedarán al juicio del profesor. Un modelo de Evaluación que contiene un test y sus correspondientes soluciones, se incluye en la Práctica Composición de Movimientos que se adjunta como anexo a la presente Memoria. Con ello queremos dar la pauta de cómo se puede realizar una prueba de evaluación sobre cada una de las propuestas. También se incluye una valoración de la Práctica, en la que se le pide al alumno que evalúe la metodología utilizada por el profesor, y el interés que le ha suscitado la Práctica. Se pretende así por una parte prestigiar la importancia de la experimentalidad en una asignatura como Física, de tal forma que repercuta en la nota final del alumno, al mismo tiempo que el profesor evalúa su propio trabajo, exponiéndolo al dictamen de sus propios alumnos. Ello le permitirá mejorar y rentabilizar mejor su labor docente. Estas pautas se pueden seguir en cada una de las propuestas. Si no se ha hecho explícitamente, ha sido por no alargar este trabajo, de forma innecesaria.

## Posibilidades de prolongación de la actividad

Con las 20 Propuestas incluidas en la monografía Física y Bicicleta, no se pretende agotar todo el aprovechamiento didáctico de la bicicleta, desde el punto de vista de la Física. Hay muchos temas que pueden y deben ser desarrollados, y que no se han hecho en el presente trabajo, y de los que es nuestra intención acometer en un futuro próximo. Aspectos como la Óptica, la Acústica, la Termodinámica, la Ciencia de los Materiales, etc. están presentes en la bicicleta, y pueden ser abordados con la misma metodología que empleamos aquí. Por ello queda un campo abierto para que el alumno investigue por su cuenta, y pueda concebir y realizar otras muchas experiencias de Física con su bicicleta. Evidentemente cada profesor puede añadir de su propia cosecha cuantas nuevas experiencias se le ocurran. Todo ello contribuirá a enriquecer este trabajo, que pretende sugerir, más que ser un Proyecto exhaustivo y acabado. En las direcciones de Internet que se adjuntan a las monografías, muchas de ellas hacen referencias a Proyectos Internacionales sobre la Física de la Bicicleta. En ellas se puede encontrar un gran campo de actuación para futuros proyectos e ideas sobre el tema, y también en ellas podemos contactar con muchos colegas docentes de otros países, interesados en el aprovechamiento didáctico de la bicicleta, que sin duda está en auge y constituye una segura apuesta de futuro.

## ANEXOS:

Desarrollo completo de la primera Propuesta Didáctica:  
"Composición de Movimientos"  
como Guión de Práctica de Laboratorio



## Cinemática: Composición de Movimientos

### **ANTES DE EMPEZAR**

- DETECTAMOS IDEAS PREVIAS (PRECONCEPCIONES)
- DEBES RECORDAR
- LECTURA O VISITA ACONSEJADA

### **DESARROLLO DE LA PRÁCTICA**

- INTRODUCCIÓN
- OBJETIVOS
- MATERIAL
- REALIZACIÓN

### **EVALUACIÓN**

### **REFERENCIAS**

### **PARA SABER MÁS**

### **VALORA LA PRÁCTICA**

### **SOLUCIONES A LA EVALUACIÓN**

## Cinemática: Composición de Movimientos

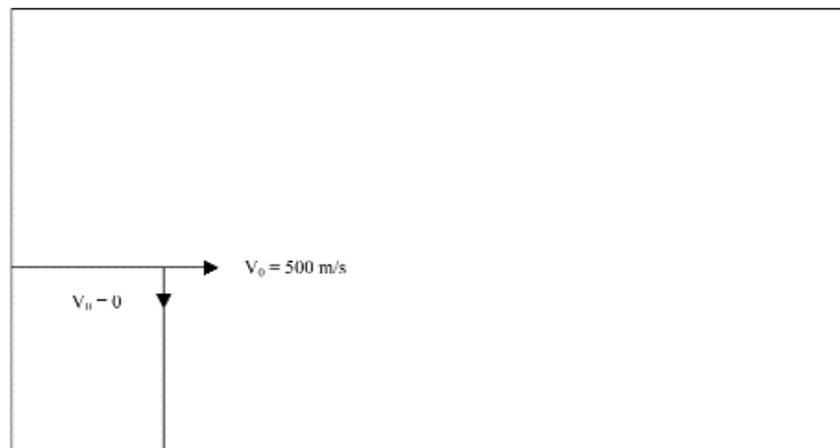
“**Aquiles**, el de los pies ligeros, el mejor corredor del **Ática**, no adelantará nunca a la tortuga en su carrera. Supongamos que la tortuga le precede en una cierta distancia. Cuando **Aquiles** llegue al punto donde se encuentra la tortuga, ésta, como por principio no está inmóvil, habrá andado algo, por poco que sea. Y cuando **Aquiles** llegue al nuevo punto, tampoco estará en él la tortuga por la misma razón. (...) Pero aún más, **Aquiles no puede moverse**: imaginemos que debe recorrer un reducido sector de espacio. Para llegar al cabo del mismo tiene que pasar por el punto medio, y para llegar a éste tendrá que pasar por el punto medio de esta mitad, etc., etc. Habría de recorrer infinitos puntos para alcanzar su objeto y, como el infinito no se puede recorrer en n tiempo limitado, **Aquiles no puede moverse**. El movimiento es imposible, racionalmente contradictorio.”<sup>1</sup>

(1) R. Gamba. *HISTORIA SENCILLADE LAFILOSOFÍA*. Ed. Rialp. Madrid. (1996)

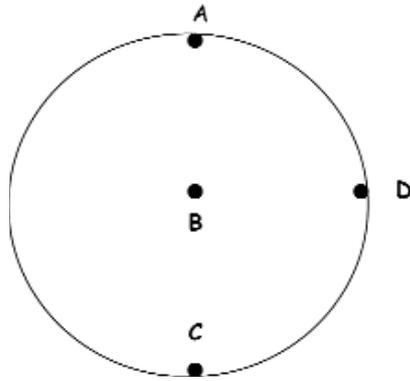
ANTES DE EMPEZAR:

DETECTAMOS IDEAS PREVIAS (PRECONCEPCIONES):

1. Desde un acantilado de 100 m de altura, se dispara horizontalmente una bala con una velocidad inicial de 500 m/s. Al mismo tiempo se deja caer verticalmente otra bala exactamente igual. Dibuja las trayectorias de cada una. ¿Cuál llegará antes al suelo?. ¿Por qué?



2. Una bicicleta rueda en línea recta a una velocidad constante. Para un observador en reposo: a) ¿Todos los puntos de la periferia de la rueda se mueven? ; b) ¿Se mueven con la misma velocidad? ; c) ¿Qué punto va más rápido? ; d) ¿Cuál es el más lento?. Dibuja el vector velocidad de los puntos A, B, C y D.



3. ¿Qué es un ángulo? (Elige entre una o varias respuestas)

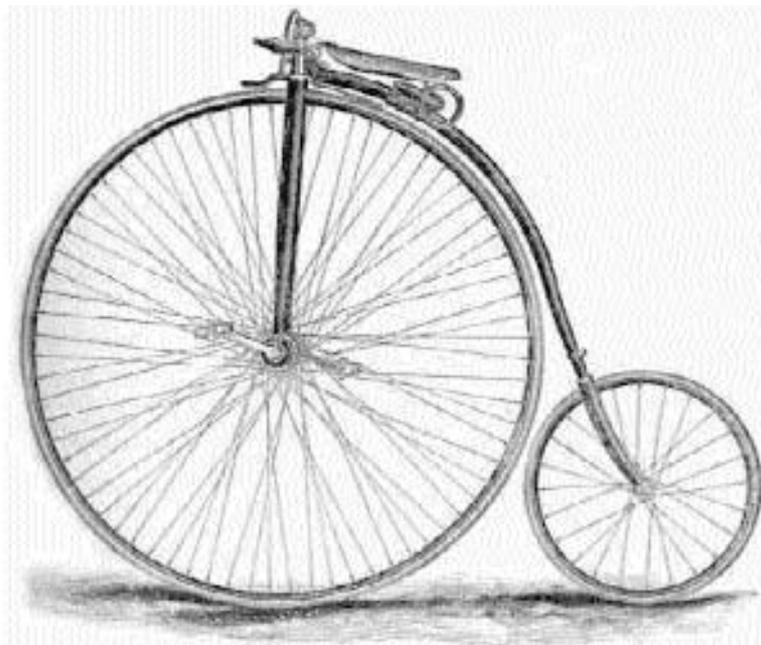
- a) Una parte de una circunferencia.
- b) Un segmento curvo.
- c) La inclinación relativa entre dos rectas.
- d) Mi definición es:

DEBES RECORDAR:

- Cinemática del movimiento rectilíneo.
- Cinemática del movimiento circular.
- Relaciones entre las magnitudes cinemáticas lineales y las angulares.

LECTURA O VISITA ACONSEJADA:

- *Página web:* [www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/solido/rodar/](http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/solido/rodar/)



## Desarrollo de la práctica

### INTRODUCCIÓN:

La relación matemática esencial de una circunferencia es muy simple:

$$\text{ARCO (L)} = \text{ÁNGULO } (\theta) \times \text{RADIO (R)}$$

Para recordarlo puedes acudir a la familiar expresión de su longitud:

$$L = 2\pi(\text{ángulo}) \times R$$

En general esta será siempre la conexión entre una magnitud lineal, y su correspondiente angular: multiplicar por el radio.

Si en las expresiones anteriores despejamos el ángulo, es inmediato ver que un ángulo ¡es un cociente entre dos longitudes! Es decir, carece de unidades en sí. De hecho los físicos las hemos introducido “con calzador” en el S.I. por esa peculiaridad, y las llamamos magnitudes complementarias (ni fundamentales ni derivadas). Los radianes, grados sexagesimales etc. son unas escalas de medidas, pero no auténticas unidades.

Recordarás que en el movimiento rectilíneo se recorre un espacio (longitud, metros). En el circular se recorren ángulos (¡siempre expresados en radianes!). Es decir existe una cinemática de la traslación ( $\mathbf{v}$ ,  $\mathbf{s}$ ,  $\mathbf{a}$ ) y otra de la rotación ( $\omega$ ,  $\theta$ ,  $\alpha$ ). De eso sabe mucho la cadena de nuestra bicicleta, ese maravilloso artilugio capaz de convertir un giro en un avance rectilíneo. Esto también lo hace la rueda, pero la cadena es una rueda sin fin de radio variable (desde casi 0 hasta  $\infty$ ), por eso transforma un movimiento circular en uno rectilíneo (“se sale por la tangente”) y al revés. La patente de la cadena de transmisión data de 1864, aún cuando se conocen diseños de Leonardo da Vinci en el Renacimiento que no llegaron a usarse (siempre encontramos a Leonardo detrás de cada invento genial). Se utilizó por primera vez en la rueda trasera de la bicicleta en 1879. La cadena además aumenta la rapidez del giro en función del número de dientes del plato y del piñón.

### OBJETIVOS:

1. Entender de forma gráfica la composición de movimientos.
2. Comprobar que el movimiento general de la rueda de una bicicleta (sólido rígido) es la composición de un movimiento de traslación del centro de masas y de un movimiento de rotación alrededor de un eje que pasa por el centro de masas.
3. Establecer la relación que debe de existir entre las velocidades de traslación y de rotación para producir un movimiento de rodar sin deslizar.

### MATERIAL:

Rueda de bicicleta

Lápiz y regla

Tiza

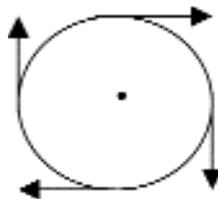
Hilo

Folio y cartón

Papel adhesivo o pegamento

### REALIZACIÓN:

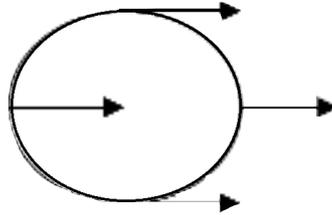
Tomamos la rueda delantera de la bicicleta, desmontada del cuadro. En un punto de su periferia atamos un extremo del lápiz con el hilo, de forma que sea tangente a la circunferencia. Simulamos así el vector velocidad lineal de un punto de la rueda:



Movimiento de rotación

Girando la rueda sin que se traslade (rotación) podemos ver que la velocidad lineal de un punto de la periferia es siempre tangente a la rueda, siendo un vector de módulo constante ( $v = \omega \times R$ ) en el que su dirección va variando continuamente.

Si ahora desplazamos la rueda sin girar (traslación) con movimiento uniforme, observamos que el vector velocidad (indicado por el lápiz) es constante en módulo, dirección y sentido:

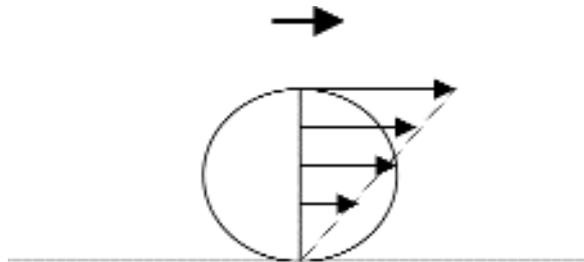


Movimiento de traslación

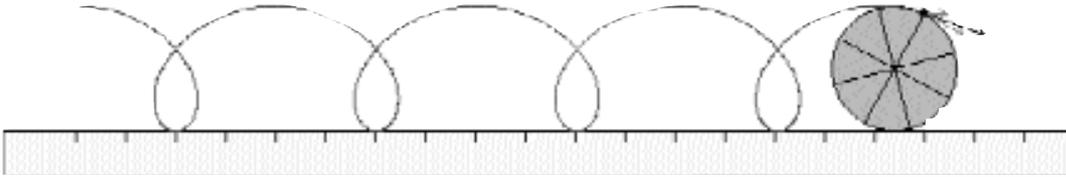
Si ahora hacemos que la rueda gire por el suelo desplazándose (traslación + rotación) es fácil visualizar que la velocidad total de los puntos de la periferia es la suma vectorial de la velocidad de traslación y la de rotación. Y si además la rueda gira y se traslada sin deslizar la velocidad de traslación del centro de masas, debe coincidir con la velocidad lineal de los puntos de la periferia: ( $v = \omega \times R$ , como se indica en la siguiente figura<sup>1</sup>)



Si nos fijamos en la velocidad de los puntos del diámetro vertical de la rueda respecto a un observador en reposo, tendríamos la siguiente representación:



Tanto en uno como en otro caso encontraremos algo parecido a<sup>2</sup>:



En donde si nos fijamos, se vuelve a poner de manifiesto que el punto de la rueda en contacto con el suelo siempre está en reposo.

### EVALUACIÓN

1. El plato de una bicicleta tiene 35 cm de radio y está unido mediante una cadena a un piñón de 7 cm de radio, que mueve una rueda de 75 cm de radio. Si la velocidad angular constante del plato es de 2 rad/s. Calcular:

- La velocidad angular del piñón y la velocidad (lineal) de un diente del piñón, respecto al ciclista.
- La velocidad de los cuatro puntos cardinales de la periferia de la rueda, respecto a un observador en reposo.

2. Corrige ahora el test de Ideas Previas (Preconcepciones) que hiciste al principio.

### REFERENCIAS

(1) y (2): Ángel Franco García. Universidad del País Vasco: *Página web*: [www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/solido/rodar/](http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/solido/rodar/)

### PARA SABER MÁS

- Serway, R. (1994). *FÍSICA. Vol. I. Cap. 11. Ed. McGraw-Hill. México.*

## SOLUCIONES A LA EVALUACIÓN

1. Denominamos:

$v, w, r$  (velocidad lineal, velocidad angular y radio del plato)

$v', w', r'$  (velocidad lineal, velocidad angular y radio del piñón)

$V, W, R$  (velocidad lineal, velocidad angular y radio de la rueda)

Como sistema de referencia, tomamos uno solidario al ciclista.

a) La cadena obliga al plato y al piñón a desplazarse con la misma velocidad lineal. Es decir  $v = v'$ . Por otro lado como:

$v = w \times r$ , y  $v' = w' \times r'$ , tendremos:  $w \times r = w' \times r'$ , es decir:  $w' = wr / r'$  que sustituyendo arroja un valor de  $w' = 10 \text{ rad/s}$ .

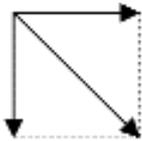
Por tanto la velocidad lineal del piñón, la obtendremos multiplicando por su radio:  
 $v' = w' \times r' = 0.7 \text{ m/s}$ .

b) Como piñón y rueda son solidarios:  $w' = W = 10 \text{ rad/s}$ . Esto nos servirá para calcular las velocidades de los puntos de la periferia:

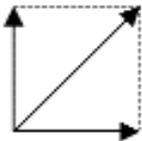
El punto superior tendrá una velocidad:  $V_N = 2WR = 15 \text{ m/s}$ .

El punto en contacto con el suelo está en reposo:  $V_S = 0$ .

Para el punto situado al Este:



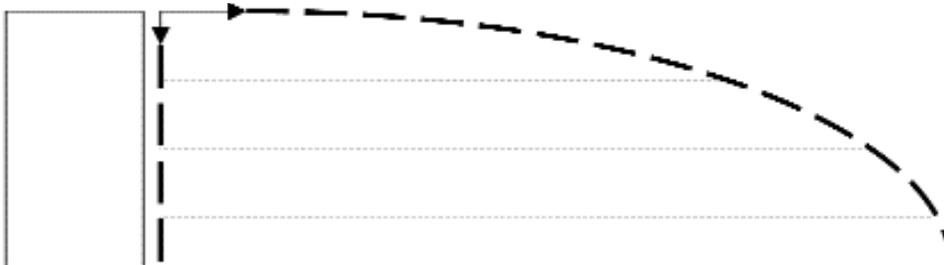
La resultante será la hipotenusa de un triángulo rectángulo de catetos iguales a  $W \times R = 7.5 \text{ m/s}$ . Por tanto tendremos  $V_E = 10.6 \text{ m/s}$



$$V_O = (7.5^2 + 7.5^2)^{1/2} = 10.6 \text{ m/s}$$

2. Las soluciones a las preguntas sobre preconcepciones son:

2. 1. Las trayectorias son:



- Las dos llegan a la vez al suelo.
- La razón es que la velocidad vertical de ambas es 0, y la aceleración vertical, la de la gravedad.

2.2.

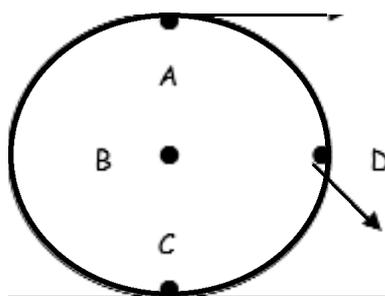
a) Si la bicicleta rueda sin deslizar, los puntos de la rueda en contacto con el suelo, están en reposo.

b) No. Cada punto se mueve con una velocidad distinta

c) El punto A. Su velocidad es doble que la velocidad de traslación de la rueda.

d) El punto C. Su velocidad es 0.

e)



2.3. Mi definición es: cociente entre un arco de circunferencia y su radio.

# Manual práctico



## Agradecimientos

Todo lo que aquí se contiene se ha gestado subido en una bicicleta, en mis largos paseos con mis hijas, en esas nuestras tardes en la isla, o a solas por tierras extremeñas. Quien pedalea encuentra tiempo para pensar, y las ideas y proyectos acuden a borbotones a tu mente cuando estás a solas con tu dos ruedas. Por eso siempre aconsejo a los amantes de la bicicleta que lleven a mano, en los bolsillos del maillot, un lápiz y algunas hojas para apuntar. Yo siempre lo hago, y esas destartaladas hojas fueron el primer borrador esquemático de este libro.

Te decía que estas letras las escribí en una bicicleta, y así debes leerlas: teniendo una muy a mano. Casi todo lo que aquí se dice es para que lo hagas y lo experimentes sólo con tu bicicleta. Verás como tantas veces te sorprende, como me sigue sorprendiendo a mí.

Por eso, no puedo por menos que darte las gracias. Mi vieja y querida bicicleta.

## In Memoriam

Tenía diez años. En casa no había tele. La década de los 60 acababa de llegar a su mitad, y era el día de Reyes.

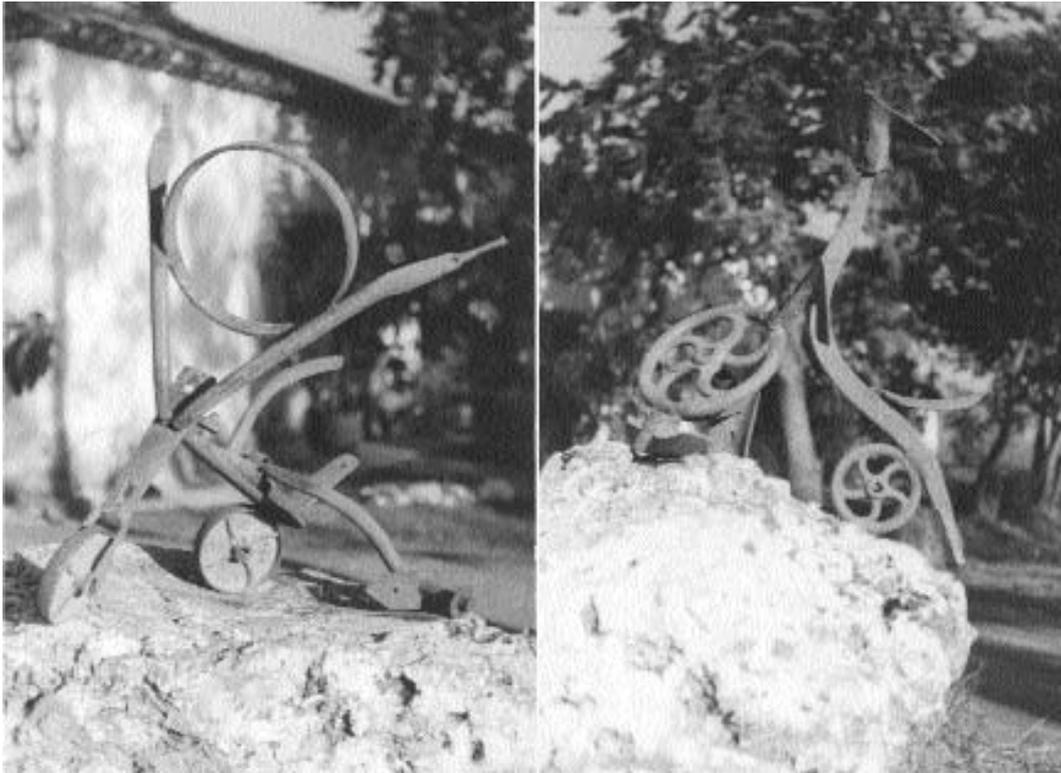
Mi hermano **Francis** (calzaba cinco años, ¡muy mal llevados!) se adelantó y entró primero en la sala de estar. Fue él quien lo anunció:

- **Luis Mari... ¡la bicicleta!**

Y allí estaba sobre la mesa, de pie, soberbia, preciosa,... ¡era mía!

En los recuerdos de mi infancia, no hay ninguno que me haya hecho latir más fuertemente el corazón que el de mi primera bicicleta. Han pasado muchos años, y esta maravillosa máquina de dos ruedas me sigue proporcionando muchos momentos de placer.

Por eso, ahora que sé que los Reyes Magos no existen (¿por qué me lo tuviste que contar, maldito **Peguro?**), me vais a permitir dedicar estas líneas a alguien que ya está con ellos, y que tantas veces fue para mí el mejor de los Reyes. Mi padre, **Luis *el de la luz***, que me regaló mi primera bicicleta.



**Agrobike**

**Camperabike**

**Bicicletas extremeñas, realizadas por Gaspar R. Ciudad,  
reciclado chatarra en arte, con materiales de labranza de las  
comarcas de la Serena y la Siberia.**

## La idea surgió

de forma inopinada, como suele suceder con estas cosas. Hacía tiempo que aparcar en las afueras del Instituto se había convertido en una empresa casi imposible. Tanto era así que un buen día decidí cambiar el coche por la vieja bicicleta que dormitaba en el garaje de casa. Es bien sabido que el que camina o pedalea tiene tiempo para poner sus pensamientos en orden, y los míos ese día se encaminaban a buscar cómo podría explicar de forma intuitiva el tema que tocaba: la conservación del **momento angular** para un sistema aislado. Y decidí que ese día los alumnos lo comprobaran con sus propias manos. Y me llevé la bicicleta a clase. Acababa de nacer un proyecto: este cuyo interés intento justificar... ¿No sería muy presuntuoso explicar Física con una bicicleta?

Costó poco desmontar la rueda delantera de la bici y hacer que por parejas mientras uno la sujetaba con ambas manos por los extremos del eje, otro la hiciera girar con rapidez. Cuando la rueda estaba en reposo se podía inclinar la rueda con suma facilidad, pero cuando la rueda giraba veloz.....¡caramba, cómo costaba inclinarla! Y ya cuando hicimos subir a una alumna a un taburete giratorio que espontáneamente comenzaba a girar en sentido contrario al de la rueda, el aplauso surgió de forma natural. Además por el mismo precio, muchos alumnos comprendieron por vez primera por qué una bicicleta es estable sólo cuando anda.

Había explicado eso mismo muchas veces en los 25 años que llevo con la tiza en la mano, pero ese día tuve la sensación que los alumnos lo habían entendido mejor y de forma más amena. Ya de vuelta a casa empezaron a desfilar por mi cabeza de forma atropellada las leyes físicas que se podrían explicar de forma experimental con una bicicleta: el centro de gravedad, las condiciones de equilibrio estático, la cinemática de la traslación y de la rotación, las leyes de Newton, las fuerzas de rozamiento, las fuerzas de inercia, la energía cinética de traslación y de rotación, el trabajo mecánico, el rozamiento, la transformación del trabajo mecánico en calor...¡toda la cinemática y la dinámica clásicas!, las leyes del electromagnetismo y de la corriente eléctrica, la ecuación de los gases ideales, las principales leyes de la óptica, nociones de acústica, la elasticidad...Todas las magnitudes Físicas fundamentales del Sistema Internacional están presentes en la bicicleta. La **Longitud**, que deberemos medir para elegir la talla adecuada. La **Masa** contra la que los fabricantes luchan incansablemente. El **Tiempo** está siempre presente en la bicicleta, pues siempre la concebimos en movimiento para que sea estable. Además los cuentakilómetros actuales tienen el cronómetro incorporado para calcular la velocidad instantánea y la velocidad media. La **Temperatura**, cuyo aumento es constatable tanto al inflar los neumáti-

cos como por el rozamiento con el suelo. La Intensidad luminosa de la óptica delantera y trasera. La Intensidad eléctrica que se genera en la dinamo y alimenta el faro, o el Mol (mediante un sencillo cálculo podríamos calcular el número de moles de aire que albergan los neumáticos a una determinada presión). También están presentes las magnitudes complementarias como el ángulo (inseparable de la velocidad angular de las ruedas). En cuanto a las magnitudes derivadas que están presentes en la bicicleta, mentalmente enumeraba sólo algunas: velocidad aceleración tanto lineales como angulares, fuerza, momento de fuerzas, cantidad de movimiento, impulso mecánico, momento angular, momento de inercia, trabajo, potencia, energía potencial, energía cinética de traslación y de rotación, diferencia de potencial, campo magnético, presión volumen, etc.

La idea fue tomando cuerpo, pues además pensaba que si era viable, podría suponer un buen recurso pedagógico en escenarios docentes precarios, tales como Centros de Enseñanza no suficientemente dotados, países del Tercer Mundo, etc. donde muchas veces la imaginación debe hacer frente a condiciones ciertamente adversas, y donde si faltan laboratorios, de seguro que abundan las bicicletas. También pensé que podría utilizarse como un recurso didáctico más en la enseñanza escolar de la Física, y que de aquí podría salir también un buen Taller de actividades formativas en torno a la bicicleta para cursos de verano, campamentos, o simplemente un libro sobre la bicicleta un tanto desenfadado. Así que ¿por qué no intentarlo?

Pensaba sobre todo en los alumnos de Bachillerato en un curso en el que íbamos muy retrasados en el programa y, como siempre suele ocurrir, los Laboratorios se llevaban la peor parte. Además por circunstancias que no vienen al caso, no podíamos disponer del instrumental necesario. Así que había que optar por quedarnos sin hacer prácticas, o estrujar la imaginación diseñando una estrategia que supliera la falta de material. ¿Podría montar practicas de Física con una bicicleta?...Si así fuera tendríamos el problema solucionado, pues casi todo el mundo tiene una en casa, y se la pueden traer sin dificultad. Además, así facilitaría la motivación de los alumnos para los que la bicicleta es algo tremendamente familiar y accesible. Pero ¿realmente este artilugio tan simple y humilde da tanto de sí?

La bicicleta tiene muchas cosas que enseñarnos en el campo de la **Física** y de la **Ingeniería**. En este logro de la humanidad que familiarmente llamamos **dos ruedas**, subyacen muchas ideas geniales del diseño, de la ingeniería, de la innovación en materiales, de inventos sorprendentes: cadena de transmisión, neumáticos, radios de las ruedas, dinamo, cuadro, suspensión, cambio de marchas, piñones, rueda libre...cada uno de estos elementos aparentemente tan simples, han supuesto un paso decisivo en lo que hoy es el vehículo de locomoción más ecológico, saludable, sencillo, barato y gratificante que conocemos. Además la bicicleta sigue abierta a continuas innovaciones e inventos: frenos de disco, suspensión, nuevos materiales, bandas antipinchazos, diseños ergonómicos...En

definitiva creemos que a los alumnos que cursan una asignatura como Física, puede enseñarles y sugerirles un sinfín de ideas y ocurrencias. También de alguna u otra forma nos apetecía difundir lo que se ha denominado la **cultura de la bicicleta** como impulsora de hábitos saludables en los jóvenes y fomento de la calidad de vida. Si conseguíamos que un solo alumno cambiara su ciclomotor por la bici, no habríamos perdido el tiempo.

Diseño, Ciencia y Técnica: ¡qué bien sintetiza la bicicleta estos tres aspectos tan aparentemente dispares entre sí! En efecto la bici es una conquista científica, y una maravilla desde el punto de vista de la técnica y del diseño. Y siempre que se habla de armonizar estas disciplinas, hay un referente obligado: **Leonardo da Vinci**, ese genio renacentista que en todo se adelantó a su época. Nadie como él supo encarnar esa bicefalia tecnológico-artística a la que hemos aludido, y nadie le superó jamás en la faceta de inventor-diseñador. Y como no podría ser de otra manera, también tuvo algo que decir en la bicicleta. Copio de la red:

“Acercar al público a la vida y obra de Leonardo Da Vinci -hombre multidisciplinario, autodidacta e investigador insaciable- y sobre todo aprender las nociones del diseño que esta figura del renacimiento italiano impulsó, es el principal objetivo de la exposición **Da Vinci Diseñador**, que inauguró la Carrera de **Diseño Industrial** en el hall central de la Facultad de Arquitectura y Urbanismo de la Universidad de Chile, ubicado en Marcoleta 250. La exposición, consta de diversos prototipos que revelan la faceta de diseñador de Da Vinci e involucran diferentes áreas del conocimiento investigadas por este renacentista, como la hidráulica, la ingeniería militar, el vuelo, la astronomía, la música, las matemáticas, la geometría, entre otras y que son integradas en cada una de sus propuestas.

En ella se puede apreciar un singular equipo de buceo, armas como la ballesta con tornillo y de mano, la navicella volante, el tambor mecánico, la vihuela mecánica (especie de viola organista), una **bicicleta** y un conjunto de herramientas e instrumentos de época que Da Vinci concibió, sin siquiera pensar que muchos de ellos serían el punto de partida de objetos como el helicóptero, el paracaídas, el arco, entre otros”<sup>1</sup>.

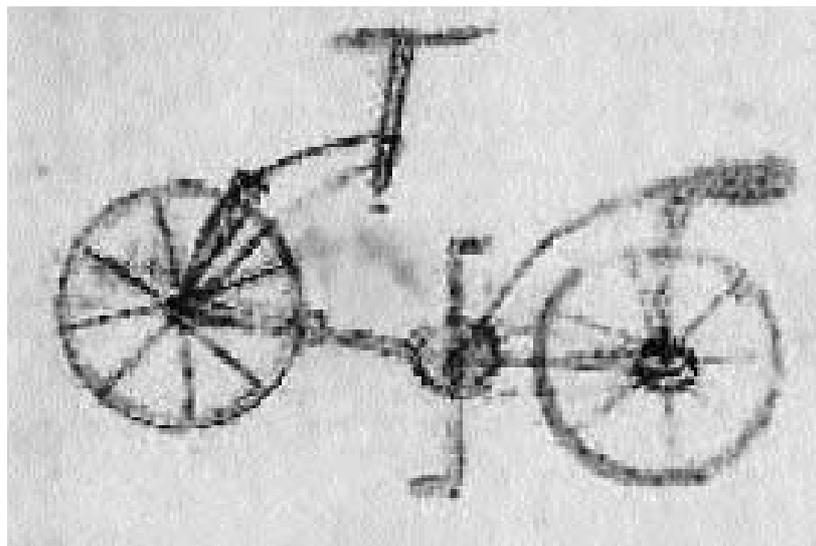
La historia atribuye la invención de la bicicleta (la famosa draisina) al **barón von Drais** de Sauerbrun (Alemania) en 1816<sup>2</sup>, pensar que había sido diseñada por el viejo y entrañable Leonardo, cuando Colón descubría el nuevo Continente, se nos antojaba increíble. Así que decidimos bucear en la historia, y descubrimos que posee todo los ingredientes que **Umberto Eco** hubiera soñado para una futura novela. No me resisto a hablar de ella aunque sea brevemente.

---

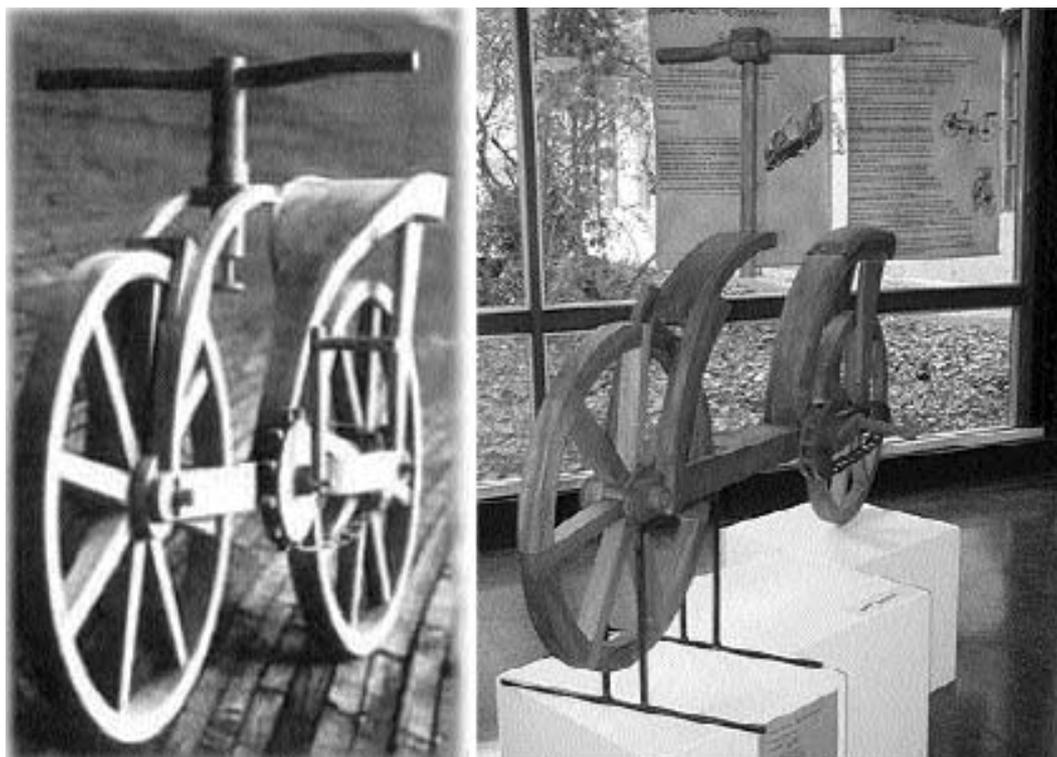
(1) [www.uchile.cl/facultades/arquitectura/publicaciones/portaplanos/porta27/expomuestras](http://www.uchile.cl/facultades/arquitectura/publicaciones/portaplanos/porta27/expomuestras)

(2) <http://giove.clavis.it/Personal/claudiob/leoaltrengb.html>

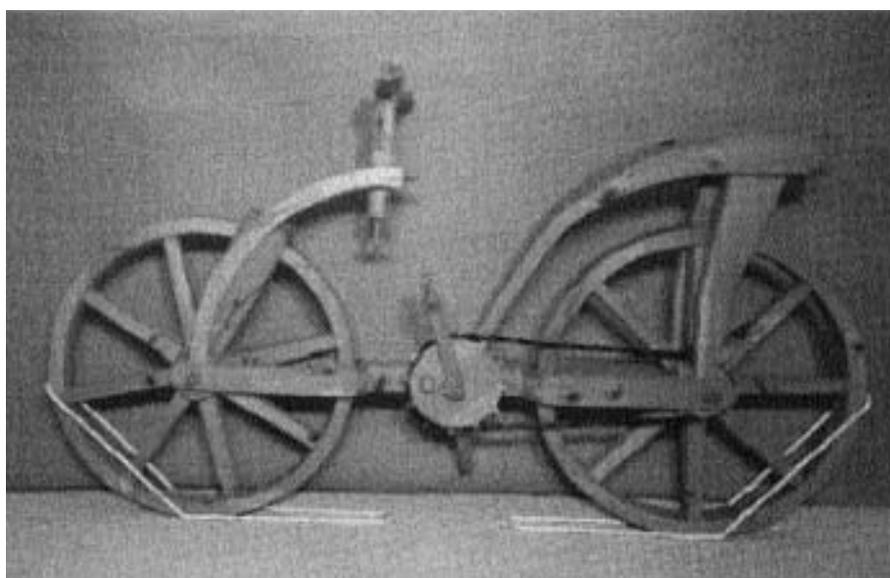
En 1961 **Pedretti** tiene acceso al **Códice Atlanticus** de Leonardo que se conservaba en la Biblioteca Ambrosiana de Milán. El manuscrito contenía dibujos realizados entre 1478 y 1518, sobre geometría, astronomía, botánica, zoología y artilugios militares. Pedretti descubre que la página 133 y siguiente están pegadas, y con ayuda de una potente luz, cree adivinar dibujos geométricos en los envés asociados. Bajo grandes medidas de seguridad los monjes del laboratorio de restauración de Grottaferrata en Roma, trabajan en el Códex Atlanticus desde 1966 a 1969, bajo un contrato que impedía que nadie más tuviera acceso a los manuscritos. Logran separar las dos páginas pegadas (fruto de la encuadernación que hiciera **Pompeo Leoni** al agrupar las hojas en el siglo XVII), apareciendo así el nuevo folio 133 v. Los monjes quedaron absortos al descubrir en la nueva hoja unos dibujos obscenos y en un borde de la página el siguiente boceto:



¡Una bicicleta con ruedas de radio, pedales, cadena de transmisión, plato, piñones de multiplicadores, manubrio de dirección y guardabarros que hacía las veces de sillín!..Los dibujos pornográficos rápidamente pasaron a segundo plano ante semejante descubrimiento. El encargado de dar la noticia al mundo fue el ilustre profesor **Marinoni**, encargado por lo demás de la transcripción del Codex Atlanticus para una edición nacional de los manuscritos de Leonardo, que lo hizo en abril de 1974. Se popularizó de tal manera que hace poco se adquirirían camisetas con el famoso diseño de la bicicleta de Leonardo por 5000 liras (3 Euros) en los puestos de cualquier mercadillo italiano. Una década después la **IBM** encarga a **Giovanni Sacchi** la realización de un prototipo en madera del supuesto diseño leonardiano, cuya imagen mostramos a continuación, junto con el realizado por el profesor **John Chalsmer** de la Universidad de Chile:



Y de nuevo el prototipo de Sacchi, visto desde otra perspectiva:



La polémica estaba servida. Ya desde el anuncio del descubrimiento, no convenció a expertos como Carlo **Pedretti** y Ladislao **Reti**, entre los principales estudiosos de Leonardo. Sin embargo, Augusto Marinoni (que fechaba el boceto del Códice en 1493) atribuyó el dibujo al joven y bellissimo **Salai**, discípulo modelo y amante de Leonardo, pero nunca puso en duda que el dibujo, toscamente realizado, emulaba un original del maestro, y lo incluye como apéndice a la primera edición del Codex Atlanticus aparecida en 1974.

De nuevo la hipótesis del falso boceto cobró fuerza cuando **Hans Erhard Lessing**, historiador de la Universidad de Ulm, sostuvo sin ambages en el transcurso de la **VIII International Cycling History Conference** celebrada en Los Ángeles en agosto de 1997, que el boceto del Códice no tenía su origen en Leonardo, y que por tanto se trataba de una burda manipulación del folio 133 v. Basaba su rotunda afirmación en el hecho de que la tinta utilizada en el boceto, no aparece hasta la segunda mitad del siglo XIX. Además enfatiza el hecho de que la inspección al trasluz hecha por Pedretti en 1961 de los folios pegados, sólo evidenció la existencia de dos circunferencias unidas por una línea transversal, sobre las cuales se habría dibujado torticera y posteriormente el supuesto boceto de la bicicleta. Pero en 1961 (fecha de la supuesta manipulación del manuscrito), sólo tenían acceso al Códice Atlanticus Marinoni y los hermanos de la abadía de Grottaferrata que realizaron la restauración entre 1966 y 1969. Excluyendo a los monjes (aunque sólo fuera por la embarazosa presencia de los dibujos obscenos), sólo quedaba Marinoni. De hecho cuando Reti conoció los dibujos, negó de forma rotunda que fueran auténticos, y en un correo electrónico que remitió a Marinoni le decía: **“es sin duda una bicicleta, pero es falsa”**. Y cuando Marinoni le preguntó: **“¿Hecha por quién, y cuándo?”**, le respondió: **“Hecha por ti”**<sup>3</sup>.

El argumento de que Leonardo en su época no podía haber inventado tantos adelantos técnicos no era concluyente. De hecho se habían encontrado bocetos suyos que ilustran transmisiones de cadenas similares a las de las actuales bicicletas. Por lo que respecta a la supuesta tinta del boceto, nunca se realizó un análisis químico de la misma, y en la actualidad esa prueba no es viable, ya que la polémica suscitada sobre la supuesta falsificación del diseño, hizo que se adoptara la decisión de proteger todas las hojas del **Códice Atlanticus** con una película de barniz, protectora del contenido y de posibles manipulaciones, imposibilitando por ende la pretendida prueba pericial.

Por otra parte la autoridad científica y moral del profesor Marinoni, es universalmente aceptada, y su fallecimiento nos ha privado de conocer más detalles acerca del descubrimiento del boceto. Sus últimos años los dedicó a defender su versión de los hechos en

---

(3) L'Espresso on line sport. 6 diciembre 2000

una página de Internet que le financió el ayuntamiento de Legnano. Marinoni afirmó poco antes de morir refiriéndose a uno de sus críticos: “Nos conocíamos hace poco tiempo y él aún no había notado mi ineptitud para el dibujo, mi honestidad de estudioso y docente de filología, y sobre todo, mi coraje para descubrir y revelar los errores de Leonardo en el campo matemático, en un campo inclinado sólo a los panegíricos”.

Así pues la cuestión sigue abierta. ¿Es Leonardo o uno de sus discípulos el autor del genial boceto que supondría que la bicicleta se inventó ¡en el renacimiento!...o todo obedece a una sacrílega incorporación espúrea, hecha por un desaprensivo? De lo que no nos cabe duda es que Leonardo diseñó la primera cadena de transmisión (folio 10 r Códice de Madrid I) que convierte perpetuamente un movimiento circular en lineal y viceversa, que posibilita la transmisión del movimiento, y el efecto multiplicador...¡en 1493!...no está mal, ¿no os parece?

## ¡Ostras, Pedrín!

El **cómic** preferido de mi infancia se llamaba **Roberto Alcázar y Pedrín**. Era éste un superhéroe que, siempre con la ayuda de su inseparable **Pedrín**, resolvía todos los intrincados casos con los que el guionista los enfrentaba. Cuando ya había leído uno, iba con él y una **perra chica** (cinco céntimos de los de antes) a cambiarlo al kiosco de **la Casiana** (“*ancá la señá Casiana*”, decíamos entonces), que meticulosamente los clasificaba en **nuevos, viejos y cosidos**. Tenías que cuidar mucho el cuento, pues si no rápidamente te bajaba de categoría, y al final acababas llevándote a casa ése en el que “**el bolas**” se había desayunado por la mañana el **huevo frito** y las **tostadas con aceite y ajo**. Y no lo digo por el olor del ajo, sino porque los **churretones** de huevo a veces te impedían leer las viñetas. Las manchadas con aceite se podían leer al trasluz, pero los fotones luminosos se rendían ante la imposibilidad de atravesar los manchones de yema. ¡No os podéis ni imaginar cómo era la yema de los huevos que ponían las gallinas que criaba la madre “**del bolas**” en el corral de su casa!

Pero volviendo al cómic El punto álgido de la historia tenía lugar cuando Roberto Alcázar decía su famoso **¡Ostras, Pedrín!**...Era la señal inequívoca de que había descubierto a la chica en poder de **los malos**, o que había caído en la cuenta de que lo estaban envenenando. Ese **¡Ostras, Pedrín!** se quedó desde la infancia en mi disco duro, e inconscientemente brota en mi interior cuando algo me sorprende. Los alumnos que tienen la paciencia de soportar mis clases, la saben de memoria y la gritan a coro cuando el intrincado teorema concluye.

Una estrategia de probada solvencia en el proceso enseñanza-aprendizaje es el denominado **aprendizaje por descubrimiento**. En este sentido tiene un gran componente didáctico lo que creemos acertado designar por **factor sorpresa**, es decir un elemento **paradójico** que parezca contradecir el sentido común, de tal suerte que impresione al alumno, capte su atención y le sorprenda, facilitándole su comprensión y su memorización, es decir los “*parece increíble, pero es cierto*”. Todos recordamos con facilidad esos **experimentos estrella**, que de alguna manera se salían fuera de lo habitual, por su puesta en escena o por su inesperado desenlace. Se trata en definitiva de que el alumno descubra algo que le haga decir en su interior un **¡Eureka!** Ello será prueba inequívoca de que ha entendido lo que se le quería explicar, y -lo que es más importante- que lo ha asimilado, e incorporado al acervo de su bagaje intelectual.

En esta línea mostramos a continuación diversas propuestas didácticas, enmarcadas en el ámbito de la **Física de la bicicleta**. Todas se pueden realizar con muy pocos recursos

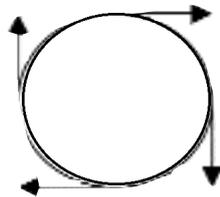
materiales, disponiendo de una bicicleta. Se han confeccionado prestando especial atención a la ley física a la que se refieren, de manera conceptual, reduciendo al mínimo las demostraciones matemáticas, que se supone el alumno conocerá de las clases teóricas. Perseguimos así incidir en que se capte la idea fundamental del principio físico sobre el que versan, y que se haga por **descubrimiento**, tratando de **sorprender** al alumno.

Se ha intentado también introducir algunos **datos históricos, anécdotas, gráficos y figuras** que de alguna manera **amenicen** la exposición y **motiven** al alumno. Esperamos, en este sentido, la comprensión suficiente por parte del lector, que nos absuelva de haber pecado de cierta ingenuidad. En ocasiones sólo se persigue una sonrisa. El lector juzgará si lo hemos conseguido.

## ¿Se puede avanzar permaneciendo en reposo?

Si preguntamos: ¿En una bicicleta en movimiento, hay algún punto de la misma que esté siempre quieto? La respuesta puede parecer de Perogrullo: si la bici se mueve, todos sus puntos y partes se mueven. Sin embargo para un observador en reposo que observa cómo se mueve la bicicleta, los puntos de ambas ruedas en contacto con el suelo ¡están siempre en reposo! Es decir, en una bicicleta moviéndose, siempre hay dos puntos que no se mueven. Ocurre eso que habrás observado en un tanque, que avanza sobre una cadena sin fin. La parte inferior en contacto con el suelo, siempre está en reposo.

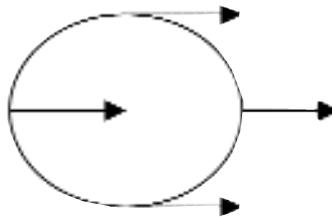
Tomamos la rueda delantera de la bicicleta, desmontada del cuadro. En un punto de su periferia atamos un extremo del lápiz con el hilo, de forma que sea tangente a la circunferencia. Simulamos así el vector velocidad lineal de un punto de la rueda:



Movimiento de rotación:

Girando la rueda sin que se traslade (rotación) podemos ver que la velocidad lineal de un punto de la periferia es siempre tangente a la rueda, siendo un vector de módulo constante ( $v = \omega \times R$ ) en el que su dirección va variando continuamente.

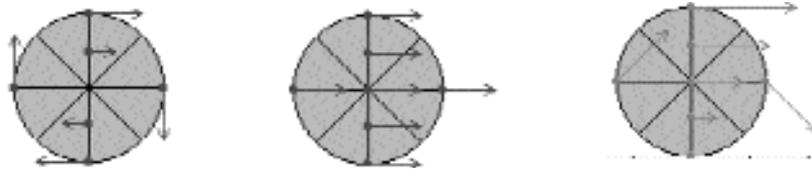
Si ahora desplazamos la rueda sin girar (traslación) con movimiento uniforme, observamos que el vector velocidad (indicado por el lápiz) es constante en módulo, dirección y sentido:



Movimiento de traslación:

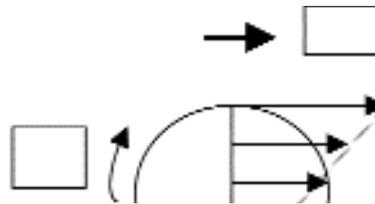
Si ahora hacemos que la rueda gire por el suelo desplazándose (traslación + rotación) es fácil visualizar que la velocidad total de los puntos de la periferia es la suma vectorial de la velocidad de traslación y la de rotación. Y si además la rueda gira y se traslada sin

deslizar la velocidad de traslación del centro de masas, debe coincidir con la velocidad lineal de los puntos de la periferia:  $\omega \times R$ , como se indica en la siguiente figura



**ROTACIÓN + TRASLACIÓN = RODAR Y AVANZAR**

Si nos fijamos en la velocidad global de los puntos del diámetro vertical de la rueda respecto a un observador en reposo, tendríamos la siguiente representación:



En la figura observamos algunos aspectos relevantes:

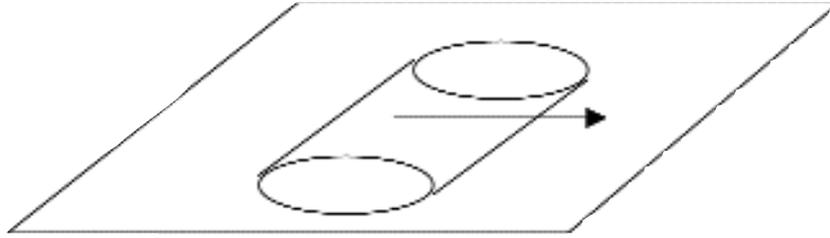
El centro de la rueda tiene una velocidad total (respecto al suelo) que coincide con la del avance de la bicicleta, y de valor  $\omega \times R$ .

El punto superior avanza con una velocidad doble que la del centro. Es el punto móvil que se mueve con mayor celeridad en una bicicleta

El punto de la rueda en contacto con el suelo ¡siempre está en reposo!, por cuanto en el la velocidad de rotación y de traslación son iguales y de sentido contrario.

Por tanto en una bicicleta en movimiento siempre hay dos puntos en reposo: los contactos de las ruedas con el suelo. Esto se visualiza mucho mejor en el avance de un tan-

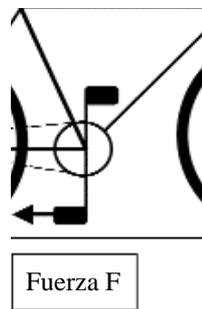
que por su escala dentada, en la que se observa que la parte en contacto con el suelo está siempre en reposo. También lo podemos comprobar pegando con papel adhesivo un folio de tal manera que forme la superficie lateral del un cilindro. Podemos hacer que avance sobre la mesa a modo de rueda, aplastándolo, y comprobaremos el estado de quietud de la parte en contacto con la mesa.



## ¡Los pedales se rebelan!

He de reconocer que la primera vez que lo hice me quedé perplejo intentando encontrar una explicación lógica.

Con ayuda de alguien sujetamos una bicicleta para que no se caiga, y ponemos un pedal abajo del todo. Si empujamos ese pedal hacia atrás, ¿Hacia dónde se moverá la bicicleta? ¿Hacia dónde se mueve el pedal?



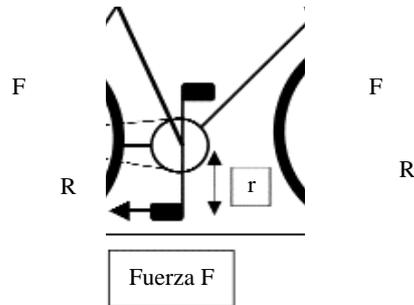
El razonamiento que todo el mundo se hace es el siguiente: mover hacia atrás el pedal inferior es mover los pedales en sentido motriz, por tanto evidentemente la bicicleta avanza hacia delante. En cuanto al pedal es obvio que si lo empujamos hacia atrás, irá hacia atrás, pues bien: vamos a hacerlo en la práctica.

Quizá no demos crédito a lo que ocurre, o incluso pensemos que es una broma del que nos sostiene la bicicleta: al darle al pedal inferior hacia atrás (sentido motriz) ¡la bicicleta va hacia atrás! Y en cuanto al pedal, eso sí que nos deja perplejo: lo estamos empujando hacia atrás, pero el condenado se rebela y se mueve ¡hacia delante!

Es muy ilustrativo pedir al alumno que encuentre una explicación física de la aparente paradoja. Si llega a encontrarla, habrá asimilado por sí sólo y de forma significativa, lo que es el momento de una fuerza, y lo pequeño que es el rozamiento por rodadura.

Efectivamente el pedal es empujado en sentido motriz, provocando un **momento motriz** dado por el producto de la fuerza  $F$  que ejercemos, y el radio  $r$  de los pedales. Pero

por la rigidez de la bicicleta esa fuerza  $F$  se transmite a todos los puntos de la misma, y por tanto en cada rueda provoca un momento contramotriz, dado por el producto de la fuerza  $F$  y el radio de las ruedas  $R$ . Al ser el radio de las ruedas mayor que el de los pedales, el momento contramotriz vence al motriz, haciendo que la bicicleta retroceda, y causando el arrastre del pedal hacia delante.



$$\mathbf{F \times R \text{ (Momento contramotriz)} > F \times r \text{ (Momento motriz)}}$$

## Una carrera que gana el último

La bicicleta tiene dos puntos de apoyo: los contactos de las ruedas con el suelo. Realmente más que puntos, son dos superficies, pero tan pequeñas que no consiguen que una bicicleta permanezca ella sola de pie apoyada únicamente en los neumáticos. Para que fuera estable necesitaría apoyarse en tres puntos que delimitaran un triángulo en cuya superficie cayera siempre el vector que representa el peso de la bicicleta. Este tercer apoyo estabilizador se consigue con las llamadas **patas de cabra**, utilizadas para dejar la bici en posición vertical, o con los ruedines traseros con los que los niños aprenden a dar pedales sin caerse. Por tanto en reposo la bicicleta posee un equilibrio inestable, y si nos subimos a ella es imposible mantenerla vertical sin movernos. Una táctica para no caernos sin pedalear es dar pequeños saltos sobre los neumáticos. Esto lo realizan con envidiable habilidad los ciclistas de trialsin, que con la bicicleta frenada y dando saltitos, hacen lo que quieren. Algo parecido ocurre con las bicicletas utilizadas por los payasos de circo. En este caso los neumáticos suelen ser bastante anchos y con baja presión, para aumentar la superficie de contacto con el suelo y la adherencia. El fundamento físico de este equilibrio dinámico es el mismo que el del saltador de muelle de juguete. En este caso el objeto es aún más inestable (sólo tiene un punto de apoyo con el suelo), y el equilibrio se consigue no dando tiempo al objeto a salirse de la vertical, corrigiendo de nuevo la verticalidad en el aire. Este juguete es un interesante caso de transformación de la energía. En lo más alto toda la energía es potencial, al bajar se va transformando en cinética con aumento de la velocidad, después al comprimir el muelle se convierte en energía potencial de recuperación elástica, que al expandirse se convierte de nuevo en cinética y luego al subir en potencial gravitatoria, comenzando de nuevo el ciclo. Evidentemente hay pérdidas energéticas por rozamiento y por calentamiento de los puntos de fricción, pero estas pérdidas son compensadas por los continuos impulsos del saltador. En los saltos de la bicicleta ocurre lo mismo, sólo que la fuerza recuperadora del muelle obedece a la ley de **Hooke**, y en la bicicleta se deben a la elasticidad y comprensibilidad del aire de los neumáticos.

Pero dejando a un lado el equilibrio por saltitos, ¿podemos mantener una bicicleta en vertical sin avanzar apenas? Es muy difícil, pues el más ligero movimiento hace que el vector peso salga de la línea de sustentación de los contactos de las ruedas con el suelo, y perdamos el equilibrio, pero nos queda un recurso: mover el manillar en la dirección adecuada. Vamos a analizar la situación. Supongamos que vamos en bicicleta y empezamos a caernos hacia la izquierda ¿qué hacemos? Quizá la respuesta intuitiva sea torcer hacia la derecha. Sin embargo, de forma mecánica e inconsciente los reflejos nos harán dar un manillazo ¡hacia la izquierda! La explicación la encontramos en el principio de acción y

reacción, pues al manillazo que damos hacia la izquierda, la bicicleta nos responde con una fuerza centrífuga de reacción en sentido contrario, es decir, con una fuerza hacia la derecha que acaba estabilizando de nuevo la bicicleta.

Para comprobarlo podemos intentar avanzar lo menos posible montados en bicicleta. Mantener el equilibrio en una bicicleta en reposo, es bastante difícil: hay que ladearse muy rápidamente, y siempre terminamos avanzando un poco y moviendo el manillar de un lado para otro en zigzag. Podemos comprobar cómo para equilibrarnos, los manillazos que damos se dirigen hacia el mismo sitio hacia el que nos estamos cayendo. Si tenemos varias bicicletas podemos hacer una carrera corta en la que el vencedor es el que llega el último. Tanto los corredores como los espectadores pueden fijarse hacia dónde se mueve el manillar para no perder el equilibrio.

Esta experiencia permite hacer entender dos aspectos de la dinámica clásica que a veces cuesta asimilar: la tercera ley de Newton, y la escurridiza fuerza de inercia denominada fuerza centrífuga.



**Una bicicleta sin ciclista es un artificio de suyo inestable...(¡sobre todo en determinadas circunstancias!)**

## ¿En qué se parece una escoba a una bicicleta?

(Si no quieres caerte ¡corre!)

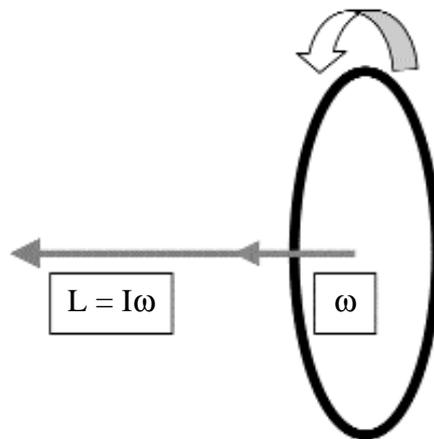
Nosotros porque estamos acostumbrados, pero a quienes vieron por primera vez al conde de Sivrac en 1791 cruzar los jardines del palacio de Luis XVI en un artilugio de sólo dos ruedas (el histórico celerífero, que aún no tenía dirección), se les debieron salir los ojos de las órbitas. Todos sabemos que la estabilidad de un objeto exige que éste se apoye al menos en tres puntos que delimiten un plano. Sin embargo una bicicleta sólo tiene dos puntos en contacto con el suelo: ¿por qué entonces no se caía el conde?



Y es que la bicicleta es un ejemplo perfecto de objeto inestable en reposo, pero muy estable en movimiento, como le ocurre a la escoba. Intentemos jugar a mantener en equilibrio una escoba al revés sobre la palma de la mano. Teóricamente si la escoba estuviera en la vertical sobre el centro de la palma, no debería caerse hacia ningún lado, pero todos sabemos que basta que el centro de gravedad de la escoba se ladee ligeramente, para que ésta pierda el equilibrio. La causa es la escasa posibilidad de que las fuerzas peso y reacción de la palma de la mano se encuentren en la pequeña superficie de sustentación del contacto entre la mano y el palo de la escoba. Para recuperar el equilibrio debemos mover la mano de un lado a otro, buscando siempre situar el centro de gravedad de la escoba en su vertical. Si la escoba empieza a inclinarse hacia la izquierda, movemos la mano hacia la izquierda y al revés. Conseguimos así que un objeto que estáticamente es inestable, alcance una estabilidad dinámica, en movimiento.

Pensemos ahora en la bicicleta. Ya vimos en la propuesta anterior que es casi imposible, estándose quieto mantenerla en vertical. Había que dar manillazos, y a la postre, siem-

pre acabamos avanzado un poco si no queremos caernos. Sin embargo es muy fácil darle estabilidad a una bicicleta: ¡empecemos a pedalear!..entonces ocurre el milagro: la bicicleta se mantiene en vertical ella sola, incluso con cierta velocidad nos podemos soltar de manos y dejar el manillar libre. Es como si la bicicleta tuviera un guardián de la estabilidad que va corrigiendo continuamente el balanceo para que su centro de gravedad caiga siempre en la vertical. Existen diversos factores de diseño de las bicicletas que facilitan esa estabilidad, pero en gran medida se debe a una ley física: la conservación del **momento angular**. Una rueda girando posee un momento angular  $L$  que depende de la masa de la rueda, de su radio (ambos implícitos en el momento de inercia  $I$ ) y de la velocidad angular de giro  $\omega$ . Esta magnitud física es un vector que tiende a conservarse, manteniendo por tanto constante su módulo su dirección y su sentido. Por ello la rueda tiende a conservar el plano en el que gira, oponiéndose a cualquier cambio, como ocurre cuando la bicicleta se ladea. El momento angular  $L$  de las ruedas es una especie de guardián de la verticalidad, y por tanto el agente más importante en la estabilidad de la bicicleta.



Vamos en la siguiente experiencia a sentir en nuestras manos la estabilidad dinámica de una bicicleta. Desmontemos la rueda delantera y cojámosla fuertemente por los extremos de su eje. Podemos comprobar cómo con gran facilidad podemos ladear la rueda a un lado y a otro, sacándola de la vertical. Pedimos ahora a otra persona que impulse la rueda para que gire con la mayor velocidad que pueda. Si intentamos ahora ladear la rueda, notaremos que el esfuerzo es mucho mayor que en el caso anterior, y es que el **momento angular** se opone a que la rueda se incline, reaccionando instantáneamente con una fuerza contraria, estabilizadora. Es una inercia de rotación que está muy a gusto con el plano de su trayectoria, como le ocurre a la tierra con su órbita alrededor del sol.

También podemos comprobarlo sin desmontar la rueda, levantando el manillar y comprobando que en reposo lo movemos con facilidad, pero si la rueda delantera gira con rapi-

dez, el manillar se opondrá a que lo giremos. Otra posibilidad es poner la bici ruedas arriba, apoyando en el suelo el manillar y el sillín. La fuerza que se necesita para inclinar la bicicleta es mayor si las ruedas están girando que si están en reposo. También si levantamos la rueda trasera cogiendo la bicicleta por el sillín, y empezamos a avanzar, comprobaremos que cuanto más deprisa corramos, más estable es la bicicleta.

Lo mismo le ocurre a una moneda que es difícil mantenerla en vertical si está quieta, pero ella sola lo hace si empieza a rodar. La peonza, el antiguo aro, el lanzamiento de disco, son ejemplos de objetos que mantienen la planaridad del giro.

## Un manillar traicionero

Todos los que montamos en bicicleta sabemos dirigirla sin dificultad, y tomamos las curvas de forma mecánica, incluso a veces sin manos. Pero quizá no hemos caído nunca en considerar que para torcer con una bicicleta, se hacen cosas paradójicas y que parecen ir contra el sentido común, y sin embargo lo que ocurre en realidad es que necesariamente tienen que cumplir las leyes de la Física.

La pregunta que hoy nos hacemos es la siguiente: ¿Cómo podemos girar a la derecha?...la respuesta que nos daría el supuesto sentido común sería: - “muy sencillo, torciendo el manillar a la derecha”...Pero resulta que a veces el sentido común es el menos común de los sentidos: para girar a la derecha con una bicicleta, lo primero que hay que hacer es torcer el manillar ¡a la izquierda!

¡Uf!, esto es más que lo razonablemente soportable, o sea que para torcer a la derecha, hay que girar el manillar a la izquierda...Pues sí, es más si torcieras el manillar a la derecha te caerías hacia la izquierda. ¿No te lo crees?...inténtalo: baja con la bicicleta por una suave pendiente para que vayas tranquilo y puedas fijarte. Ahora suelta la mano izquierda de manera que conduzcas el manillar sólo con la derecha. De esta manera únicamente puedes torcer el manillar hacia la izquierda, pero puedes comprobar que si lo haces tu bicicleta va hacia la derecha, es más utilizando sólo el manillar nunca podrás torcer hacia la izquierda en este supuesto.

¿Entonces cómo se realiza una curva a la derecha con una bicicleta?...pues primero teniendo en cuenta que siempre que un objeto describe una trayectoria circular, aparece una fuerza de inercia llamada centrífuga que tiende a sacarlo de la curva. Para evitarlo, hay que inclinar la bicicleta (o peraltar la curva), de tal manera que la fuerza centrífuga sea cancelada con la componente horizontal del peso. Dicho en otras palabras: una bicicleta no puede girar nunca en vertical torciendo sólo el manillar. Hay que inclinarla primero hacia el mismo lado que la curva, para vencer la fuerza centrífuga debida a la trayectoria curva de la bicicleta.

Y ¿cómo inclinamos la bicicleta a la derecha para tomar la curva a la derecha? Pues girando el manillar a la izquierda. En este caso nos ayuda otra fuerza centrífuga diferente a la anterior: la que aparece como consecuencia de dar un manillazo. En efecto, al girar el manillar a la izquierda, por el principio de acción y reacción (3ª Ley de Newton), aparece una fuerza centrífuga dirigida hacia el exterior del giro, y que consigue inclinar la bici-

cleta en la dirección deseada: hacia la derecha. Con la bicicleta inclinada ya estás en condiciones de luchar contra la otra fuerza centrífuga que intenta que te caigas hacia la izquierda cuando describes una curva a la derecha.

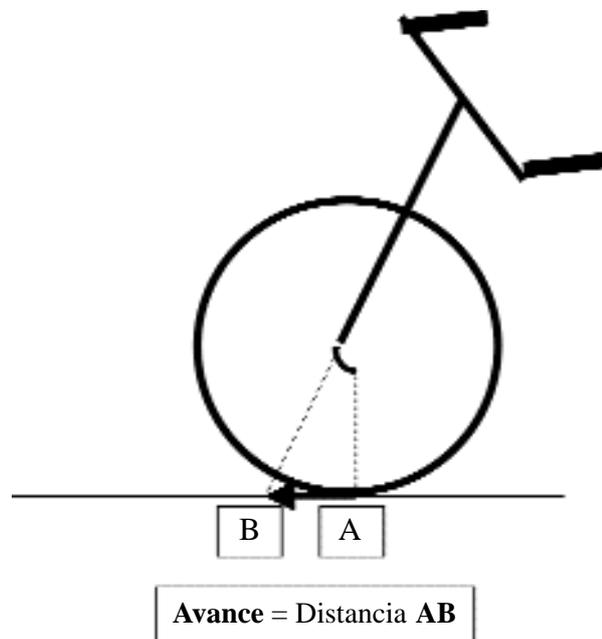
Muy similar es tomar una curva sin manos. En este caso el movimiento inicial de las caderas debe ser contrario a la dirección de giro deseada: a la izquierda para una curva a la derecha.

## Una bicicleta con piloto automático

Una vez que comenzamos a girar hacia la derecha, quizá pensemos que es preciso entonces que de vez en cuando sigamos girando el manillar hacia la derecha. No es necesario, la bicicleta se dirige por sí sola describiendo la curva. Esto lo comprenderemos en el transcurso de la presente propuesta.

Vamos a realizar una sencilla experiencia. Tengamos la bicicleta quieta, en posición vertical. Inclinémosla un poco hacia la derecha ¿qué le ocurre a la rueda delantera?...que espontáneamente se tuerce también hacia la derecha. Por tanto cuando tomamos una curva, y necesariamente inclinamos la bicicleta, la rueda delantera va girando continuamente ella sola en el sentido de la curva, describiéndola poco a poco. Es como si la bicicleta tuviera un piloto automático para describir curvas de manera suave y espontánea.

Esta cualidad de la bicicleta que la ayuda a dirigirse por sí sola, facilitando el giro, es debido al denominado **avance**, es decir a la distancia entre el punto de apoyo de la rueda delantera con el suelo, y el punto donde la prolongación del eje de dirección corta al suelo. El **avance** es uno de los parámetros esenciales a la hora de diseñar una bicicleta, y juega un papel crucial tanto en la estabilidad como en la amortiguación de los impactos con las irregularidades



del terreno. En la historia de la bicicleta se ha luchado siempre por conseguir mayor confort. Muchos han sido los inventos que a ello han contribuido. En 1885 se introduce la suspensión del sillín y la inclinación de la horquilla, que permite que los llantazos de las irregularidades del terreno, no reviertan directamente sobre la columna de dirección, permitiendo una amortiguación por flexión de la horquilla. Pero sin duda quien más ha contribuido al confort de la bicicleta ha sido el veterinario irlandés **John Dunlop**, quien en 1890 decidió que las dos ruedas debían andar sobre cámaras de aire, inventando (y forrándose al mismo tiempo en tan sólo 5 años que se hizo millonario) los neumáticos hinchables. Desconozco qué monumentos adornarán las plazas de Belfast, pero sin lugar a dudas en una de ellas debería existir uno con una leyenda que rezara: “**Al inventor del neumático, millones de culos<sup>1</sup> agradecidos**”.

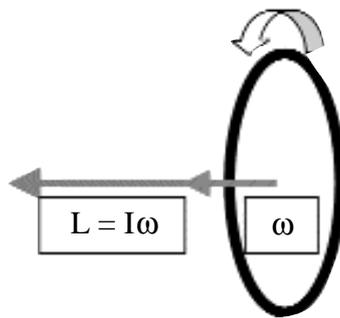
Al igual que la escoba, la bicicleta es estable en movimiento, pero a diferencia de ésta no tienes que estar corrigiendo continuamente la dirección para poner el palo bajo el centro de gravedad. La bicicleta lo hace ella sola por nosotros y automáticamente, así si empieza a tumbarse hacia la derecha, la rueda delantera tuerce hacia ese mismo sitio para que el centro de gravedad busque de nuevo su posición de equilibrio estable, consiguiendo ponerla de nuevo en vertical incluso si vamos sueltos de mano. En definitiva es más fácil mantener el equilibrio en una bicicleta rodando que con una escoba (a no ser que te llames **Harry** y te apellides **Potter**). La génesis por tanto para describir una curva a la derecha es la siguiente: iniciamos la curva dirigiendo la bicicleta en sentido contrario, es decir giramos el manillar a la izquierda, o si conducimos sin manos damos un golpe de caderas hacia la izquierda. La fuerza centrífuga que reacciona al manillazo o al caderazo, hará que la bicicleta se incline hacia la derecha y así el peso equilibre a la nueva fuerza centrífuga que aparecerá y que intentará sacarnos hacia el exterior de la curva. La inclinación de la bicicleta hace que aparezca un momento debido al **avance** que hace que la rueda delantera gire espontáneamente hacia la derecha. Todo lo ha realizado ese piloto automático que tienen las bicis denominado **avance**.

---

(1) Sin duda se trata de una errata. Debe leerse culottes.

## Una bicicleta con doble piloto automático

Pero la bicicleta no tiene un piloto automático sólo: tiene dos. Además del avance, en la bicicleta intervienen unas fuerzas llamadas giroscópicas que hacen que tomar una curva con ella sea coser y cantar. Estas fuerzas aparecen cuando sobre un objeto que gira se realiza una fuerza externa. Básicamente diremos que un sólido rígido al girar posee un momento angular o cinético  $\mathbf{L}$  que en el caso de la rueda de una bicicleta es un vector cuyo módulo es el producto del momento de inercia de la rueda respecto de su centro  $I$ , por la velocidad angular de giro  $\omega$ . Su dirección es perpendicular al plano de la rueda y el sentido nos lo da el avance de un tornillo que gire como lo hace la rueda:



Si sobre un cuerpo que gira se aplica una fuerza externa que no pase por su eje de giro, aparece un momento  $\tau$  (producto vectorial del vector distancia desde el punto de apoyo, por la fuerza). La ecuación fundamental de la dinámica de la rotación establece que:

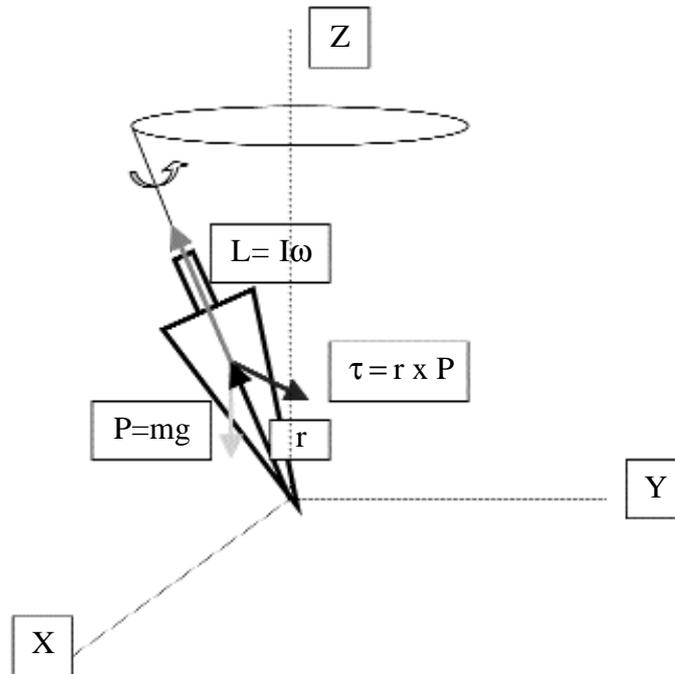
$$\tau = d\mathbf{L} / dt$$

Esto es, si no existe momento de fuerza externo  $\tau$ , el momento angular  $\mathbf{L}$  permanece constante, pero si existe un momento externo,  $\mathbf{L}$  variará en la forma:

$$d\mathbf{L} = \tau \times dt$$

Esto es, el cambio en el momento angular tiene la dirección del momento de la fuerza externa (de forma análoga a como el cambio de la cantidad de movimiento tiene la dirección de la fuerza aplicada). Esta ley exige que el vector  $\mathbf{L}$  vaya siempre buscando al

vector  $\tau$ , dando lugar a una persecución sin fin que hace girar al objeto alrededor del punto de apoyo. Es el llamado movimiento giroscópico que tiene lugar, por ejemplo, en el girar de la peonza:



El momento del peso  $\tau$  obliga al momento angular  $L$  a cambiar de dirección y perseguirle, originando la llamada **precesión** que obliga a la peonza a describir una rotación alrededor del eje Z.

En la bicicleta ocurre igual. Pensemos que queremos realizar un giro a la izquierda. Si no queremos que la fuerza centrífuga nos tumbe hacia la derecha, debemos inclinar previamente la bicicleta en el sentido del giro, hacia la izquierda. Pero entonces el peso  $P$  sale fuera de la pequeñísima superficie de sustentación de los neumáticos con el suelo, y aparece un momento del peso  $\tau$  respecto al punto de apoyo de la rueda delantera. Hemos pedido a Don Alberto que nos ayude a ilustrar lo que ocurre:



**Einstein** trata de tomar una curva a la izquierda y para ello ha inclinado la bicicleta a su izquierda. Inmediatamente aparece un par de fuerzas (Peso y Reacción del suelo) que originan el momento  $\tau$  dirigido hacia atrás de la bici. Como consecuencia el momento angular  $\mathbf{L}$  de la rueda delantera tiene que ir en busca de  $\tau$  y para ello  $\mathbf{L}$  se mueve hacia atrás girando la rueda delantera hacia la izquierda. **Einstein** por tanto no tiene que hacer nada con el manillar. Únicamente ha de preocuparse de tumbar la bicicleta en la dirección adecuada. Una vez que lo ha hecho, el primer piloto automático llamado **avance** tuerce la rueda hacia la izquierda, y el segundo piloto automático

llamado giróscopo se va encargando de ir torciendo la rueda para que nuestro físico pueda describir plácidamente la curva sin ningún esfuerzo. ¿No le veis la cara de felicidad que tiene?

Quiero torcer a la izquierda. Entonces debo dar un manillazo a la derecha para que el **principio de acción y reacción** me incline a la izquierda. De esta forma conseguiré que la **fuerza centrífuga de inercia** (puesto que soy en este momento un **sistema no inercial**) no me deslice hacia la derecha. Pero como entonces mi **peso** y el de la bicicleta ejercen un **momento** respecto al punto de contacto de la rueda con el suelo, el **avance** positivo de mi bicicleta torcerá la rueda delantera hacia la izquierda y comenzaré mi giro. Justo en ese instante, sobre el **momento angular** de la rueda actuará el par **peso-reacción** del suelo, y se darán las condiciones exigidas para el **movimiento giroscópico**, que hará que el momento angular gire, aproximándose al momento de la resultante de mi peso y el de la bicicleta, y entonces la rueda delantera girará hacia la izquierda que es hacia donde yo quiero torcer. Y yo me pregunto: **¿Quién me mandaría a mí subirme en una bicicleta? ¿Qué hace un tipo como yo en un sitio como éste?**

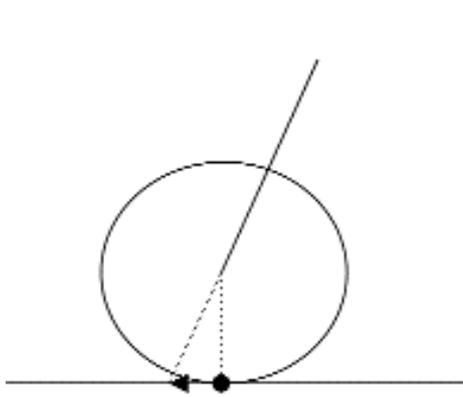


## ¿Seguro que sabes montar en bicicleta?

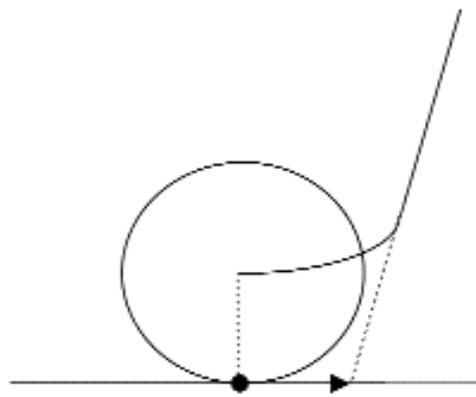
Todos sabemos montar en bicicleta más o menos. Pero vamos a realizar una nueva experiencia. En esta ocasión vamos a pedirle al mejor ciclista de nuestro grupo que conduzca una bicicleta cualquiera, por ejemplo una de paseo. Eso sí nos hemos permitido la libertad de ponerle el manillar al revés, si es preciso liberando las fundas de los cables de los frenos, si es que impiden invertir el manillar. ¿Seguro que es el mejor ciclista del grupo?...¡mira cómo le cuesta gobernarla!. ¿pero si casi no puede mantener el equilibrio en una sencilla bicicleta de paseo?

Para entender lo que ocurre vamos a hablar un poco del papel que juega nuestro **avance** no ya como piloto automático al describir una curva, sino como estabilizador de la bicicleta. En general diremos que un **avance** de mayor longitud hace la bicicleta más estable y confortable, pero menos ágil de maniobras. Así las bicicletas de paseo tienen un **avance** generoso. Las bicicletas de carreras necesitan ser muy maniobrables, y tienen un **avance** relativamente pequeño, en torno a los 6 centímetros. Más pequeño aún es el **avance** de las bicicletas de velódromo, que tienen la horquilla recta. Son muy ágiles, pero las vibraciones producidas por las irregularidades de la pista se transmiten íntegra y directamente a la columna de dirección. Las bicicletas de persecución de motos y las utilizadas por los payasos en los circos son muy estables y tienen la horquilla doblada hacia atrás para que el **avance** sea largo. Por último una bicicleta con **avance** negativo (el contacto de la rueda está delante de la intersección del eje de dirección con el suelo) es inestable y por tanto no se puede montar.

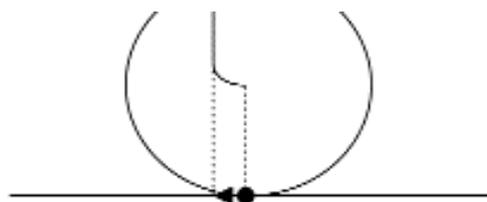
Una experiencia ilustrativa puede ser medir el **avance** de distintas bicicletas: de montaña, de paseo, de carreras, sacando conclusiones sobre su estabilidad. A continuación podemos darle la vuelta al manillar totalmente (si la bicicleta nos lo permite) e inclinar la bici hacia un lado viendo hacia dónde tuerce la rueda delantera. Y por supuesto probar la experiencia de montar una bicicleta en la que hemos invertido el manillar. Podemos intentar conducirla y sacar conclusiones.



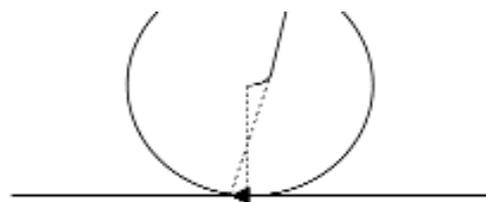
**avance positivo**



**avance negativo**



**avance bicicleta de marabarista**



**avance bicicleta de carrera**

## Un ti vivo inesperado

El principio de acción y reacción está íntimamente relacionado con la conservación de la cantidad de movimiento y la conservación del momento angular de sistemas aislados. Vamos a ilustrar esta relación con una rueda de bicicleta y una banqueta giratoria como las que se utilizan en los laboratorios. Para ello nos subimos de pie en la banqueta, que gire con facilidad sin apenas rozamiento, y sostenemos por los extremos del eje la rueda de una bicicleta. Pedimos que alguien impulse fuertemente la rueda para que empiece a girar todo lo más rápido posible. Mientras la rueda gira en posición vertical, la banqueta permanece en reposo. Tumbamos ahora la rueda (ya sabemos que nos costará un esfuerzo extra) para que gire en posición horizontal. Entonces todo el sistema banqueta-individuo-rueda comenzará a dar vueltas en sentido contrario al del giro de la rueda. Si giramos la rueda  $180^\circ$  manteniéndola siempre en horizontal, para que gire ahora en sentido contrario al anterior, empezaremos a girar junto con la banqueta en sentido contrario a como lo hacíamos antes.

En la tercera ley de Newton hay algo extraño. Esta ley llamada de acción y reacción está en el fundamento de las tres leyes de conservación más importantes de la dinámica clásica: la de la cantidad de movimiento, la de conservación del momento angular y la de conservación de la energía. Newton que formuló la ley no reparó en esta conexión. En un mundo en continuo cambio estas tres magnitudes se conservan en los sistemas aislados. De alguna manera la tercera ley nos dice que la acción en un cuerpo produce una reacción en otro que tiende a anular a la primera. Así si saltamos de una barca en reposo al embarcadero, mi acción provoca el retroceso de la barca para que la cantidad de movimiento del saltador se cancele con la del bote (igual pero de sentido contrario), para que la suma sea cero, como al principio. Dicho de otra forma, la cantidad de movimiento fluye de un cuerpo a otro para conservarse. Con la energía ocurre lo mismo, que fluye de unos a otros cuerpos pero siempre se conserva. La rueda y la plataforma constituyen un ejemplo similar al de la barca y el saltador. Si bien estos últimos se desenvuelven en la dinámica de la traslación, la rueda y la baqueta lo hacen en la dinámica de la rotación, pero el fundamento es el mismo. El momento angular inicial en la dirección vertical es cero, y debe ser cero después de tumbar la rueda. Para ello es necesario que el momento angular de la rueda en su giro horizontal fluya hacia la banqueta cambiado de signo, haciéndola girar en sentido contrario para que la suma de los dos sea cero, como al principio. Como quiera que el momento angular es en este caso el producto del momento de inercia  $I$  por la velocidad angular  $\omega$  ha de verificarse:

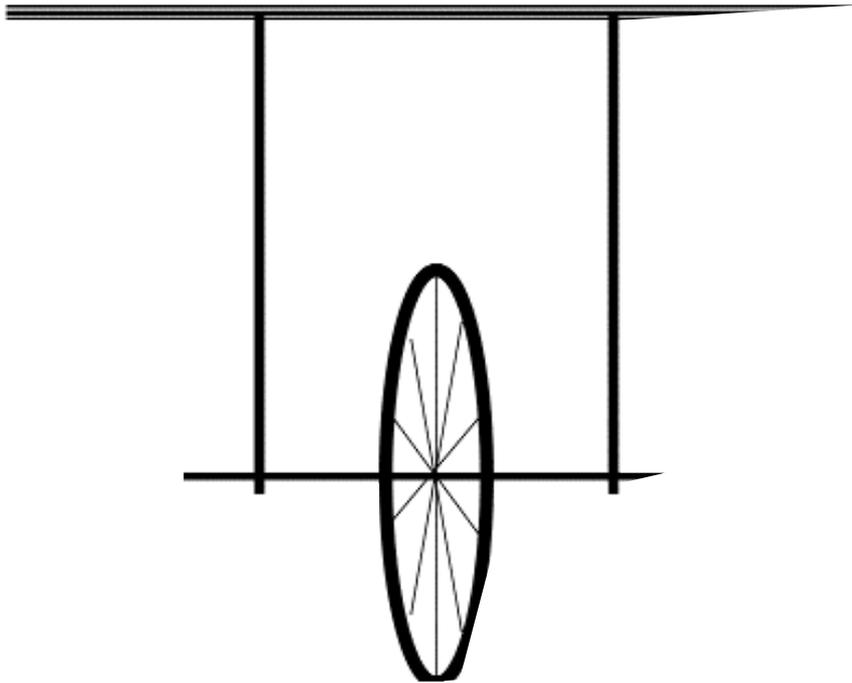
$$0 \text{ (Momento cinético inicial)} = (I_{\text{rueda}} \times \omega_{\text{rueda}}) + (I_{\text{banqueta-individuo}} \times \omega_{\text{banqueta}})$$

$$\omega_{\text{banqueta}} = - (I \times \omega)_{\text{rueda}} / I_{\text{banqueta-individuo}}$$

Expresión que pone de manifiesto que la banqueta debe empezar a girar, y lo hace en sentido contrario al de la rueda, reaccionando contra el movimiento de ésta.

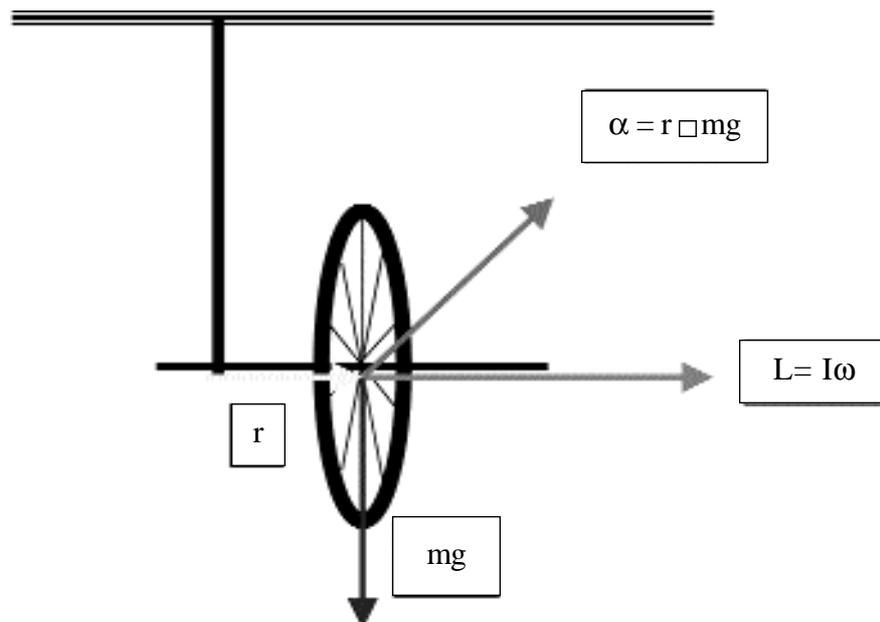
## Un equilibrio imposible

Supongamos que tuviéramos dos barras colgadas del techo que pudieran sostener el eje de la rueda de una bicicleta.



Si quitáramos una de las barras, por ejemplo la derecha, el peso de la rueda y la reacción en el soporte izquierdo ejercerían un par de fuerzas que haría que la rueda no estuviera en equilibrio, y caería girando hacia abajo alrededor del único soporte.

Supongamos ahora que la rueda está girando con una velocidad angular  $\omega$ . Una vez que gira separamos el soporte derecho de tal manera que la rueda se apoya únicamente en la barra de la izquierda, cuya articulación que la sujeta al techo le permite girar libremente. Analicemos las fuerzas y los respectivos momentos que actúan sobre la rueda:



El momento  $\tau$  es perpendicular a  $L$  y por tanto no actuará sobre su módulo, pero obligará al momento angular a cambiar su dirección persiguiendo a  $\tau$ . La rueda comenzará entonces a describir una trayectoria circular alrededor de la barra soporte, permaneciendo perpendicular al suelo en un equilibrio que al sentido común se le antoja imposible.

## Un centro de gravedad que no está en la bicicleta

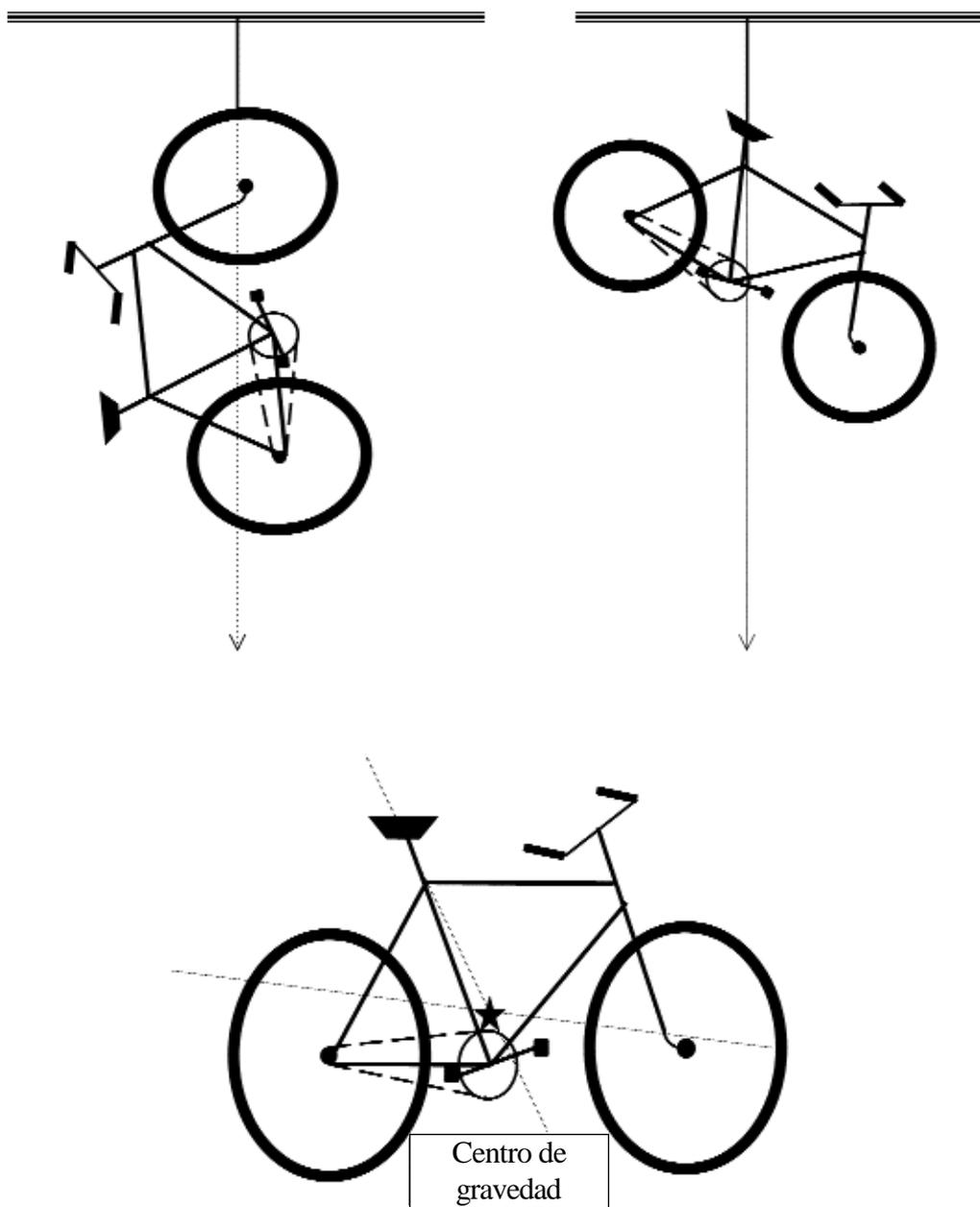
Una definición cualitativa del centro de gravedad de un cuerpo podría ser esta: el punto donde podemos suponer que se halla concentrada toda la masa del cuerpo, o también el punto de aplicación del vector peso del cuerpo. La posición del centro de gravedad es fundamental a la hora de considerar el equilibrio de los cuerpos, de tal manera que un cuerpo en reposo está en equilibrio si el peso y la reacción del suelo se cancelan mutuamente, es decir si están exactamente en la misma vertical, o dicho de manera más gráfica, si la línea que contiene al vector que representa el peso del cuerpo (dirigido hacia el centro de la tierra) atraviesa la superficie de sustentación del cuerpo (engendrada por los puntos del cuerpo en contacto con el suelo). Vamos a ilustrarlo con un sencillo ejemplo.

El centro de gravedad del cuerpo humano en posición de pie, se encuentra en algún punto del interior de nuestro tronco. Así si estamos con las piernas ligeramente abiertas el peso cae dentro de la superficie de sustentación engendrada por el contorno exterior de nuestros pies, y nos encontramos en perfecto equilibrio. La estabilidad es mayor si la superficie sustentadora es grande. Si estando así levantamos la pierna izquierda, la superficie sustentadora ya no contiene a la dirección del peso, y perderíamos el equilibrio, pero basta un ligero desplazamiento del tronco hacia la derecha, para que peso y reacción del suelo se encuentren de nuevo, llegándose como al principio a una nueva situación de equilibrio. Vamos a repetir este sencillo experimento con una ligera variante. Nos acercamos a una pared y pegamos totalmente a ella el costado derecho de nuestro cuerpo. Intentemos ahora levantar la pierna izquierda para quedarnos a la pata coja, como antes...¡imposible! La razón ya ha sido apuntada más arriba: en este caso la pared impide el desplazamiento del tronco a la derecha buscando que la sombra vertical del centro de gravedad caiga sobre la superficie de la planta del pie derecho (único apoyo en este caso).

La posición del centro de gravedad de un objeto dinámico como la bicicleta es muy importante para su estabilidad. Cuanto más bajo esté, menor será la energía potencial, se pegará más al suelo y, en definitiva, el móvil será más estable. Esta es la razón por la que los Fórmula 1 suelen ser tan bajitos. Pero, ¿dónde está el centro de gravedad de una bicicleta? Determinarlo es muy sencillo.

Necesitaremos colgar la bicicleta bien del techo, bien poniendo un gancho en el marco superior de una puerta o de cualquier forma que se nos ocurra (podemos también hacerlo con ayuda de un palo que se apoye en lo alto de una puerta). Una vez que la bicicleta esté quieta y con el manillar recto, trazaremos, con ayuda de una plomada, la vertical desde el

punto donde está colgada la bicicleta hacia el centro de la tierra, dejando señalado en la bici dicha dirección mediante un hilo o cinta adhesiva. Colgando la bicicleta desde otro punto distinto del anterior, volvemos a hacer lo mismo. El punto de intersección de los hilos nos señalará el centro de gravedad de nuestra bicicleta.



El centro de gravedad de la bicicleta lo encontraremos unos centímetros por encima del plato, en el interior del cuadro, pero no corresponde a ningún punto material de la bicicleta. Esto es: el centro de gravedad de un cuerpo puede encontrarse fuera de él. En cualquier caso este centro de gravedad influye relativamente en el total, puesto que la bicicleta siempre va a desplazarse con un corredor subido en ella. Es más, el peso del ciclista (tomando como referente un corredor adulto) suele ser unas 7 veces el de la bicicleta. Esto quiere decir que el centro de masas resultante de los dos, se va encontrar muy por encima del calculado para la bicicleta sola. Por tanto lo interesante será calcular el centro de gravedad del sistema formado por el ciclista y su bicicleta. Este problema lo afrontamos en la propuesta siguiente.

## ¿Dónde está el centro de masas de un ciclista?

El cuerpo humano no es precisamente un modelo de sólido rígido. Las distancias relativas entre las partículas que lo constituyen no permanecen constantes. Por el centro de masas del cuerpo humano, depende de la posición instantánea que adopte el cuerpo. En la práctica del deporte la cosa se complica aún más, pues cada disciplina exige unos movimientos peculiares, y además el deporte está reñido con la quietud que se exige a la hora de hallar el centro de masas de un cuerpo. Así que hemos de diseñar una estrategia que nos permita afrontar el problema.

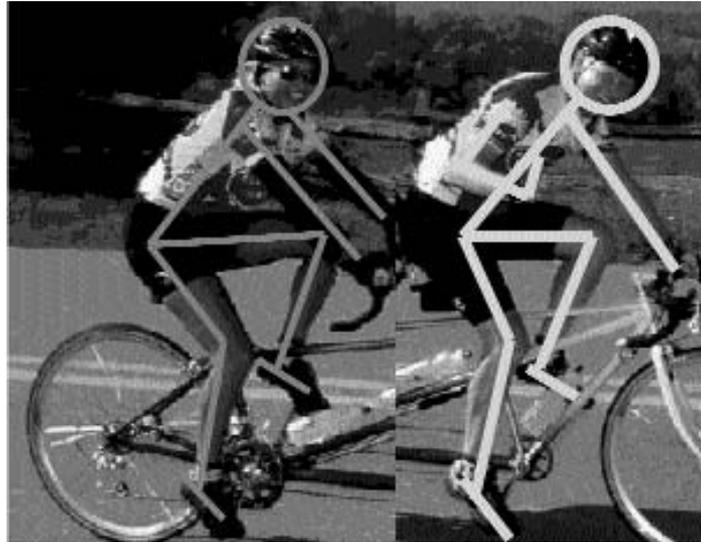
Una bicicleta convencional suele tener una masa próxima a una decena de kilogramos. Supongamos que el ciclista tiene una masa de 75 kg: ¿mejorará la estabilidad de la bicicleta al subirse en ella? Tiene a favor que el peso es mayor (a mayor peso más estable es el objeto), y que la superficie sustentadora también es mayor (por la deformación de los neumáticos). Sin embargo el centro de masas del ciclista está por encima del sillín aumentando enormemente (pesa del orden de 7 veces la bicicleta) la energía potencial del conjunto, en detrimento de su estabilidad.

Ahora bien el cálculo del centro de masas de un ciclista en posición de pedaleo no es trivial. Menos mal que los físicos tenemos recursos para casi todo. Si no prestad atención a la siguiente anécdota. Se trataba de calcular el volumen de una vaca. Rápidamente el matemático argumentó que ello era posible con una serie de integrales triples calculando, previamente las ecuaciones matemáticas que describían el contorno del vacuno. El ingeniero no aguantó más. Interrumpiendo al matemático dijo que él tenía un sistema más práctico: ¿sumerjamos al animal en una piscina y midamos el volumen del agua que ha desalojado! Todos aplaudieron la idea ingeniero, pero por cortesía le preguntaron al físico: y a ti ¿no se te ocurre nada?...éste se limitó a decir: supongamos que la vaca es esférica...Y zanjó definitivamente la cuestión.

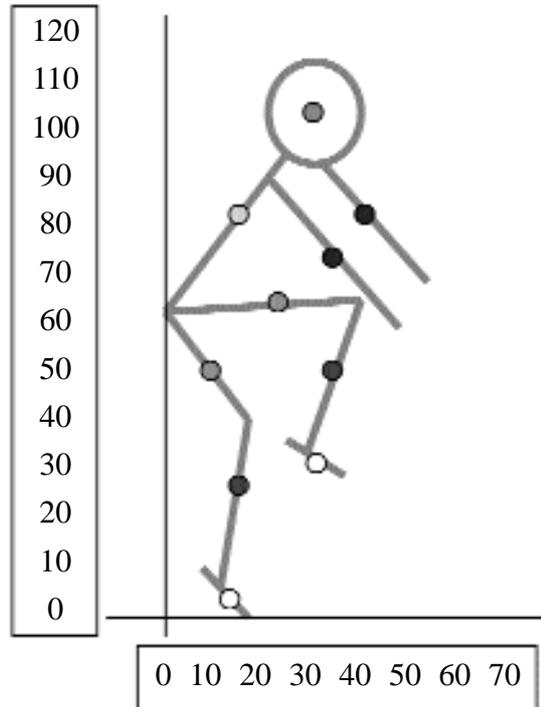
Nosotros no vamos a considerar que el ciclista es esférico, pero sí que, como suelen hacer los modelos físicos, vamos a simplificar el problema. Fijémonos en los ciclistas del tandem que mostramos a continuación:



Como aproximación vamos a considerar el cuerpo de los ciclistas como miembros separados, y cada miembro lo sustituimos bien por un segmento bien como un círculo (cabeza), y todos ellos con su centro de masas en su centro de simetría. Una simplificación tal nos llevaría a:



Nos quedamos con la posición de la ciclista, pues el caballero nos saluda con la derecha (cosa que no se debe hacer, a no ser que sea zurdo), y esa no es la posición estándar para pedalear. Si llevamos el diagrama de la chica a unos ejes coordenados cartesianos señalando la posición del centro de masas de cada miembro tendríamos algo así como:



A continuación mostramos en la siguiente tabla la masa de cada miembro (para una chica de 60 kg de masa, y 1,60 metros de altura) y la posición de sus respectivos centros de masa calculados del diagrama anterior:

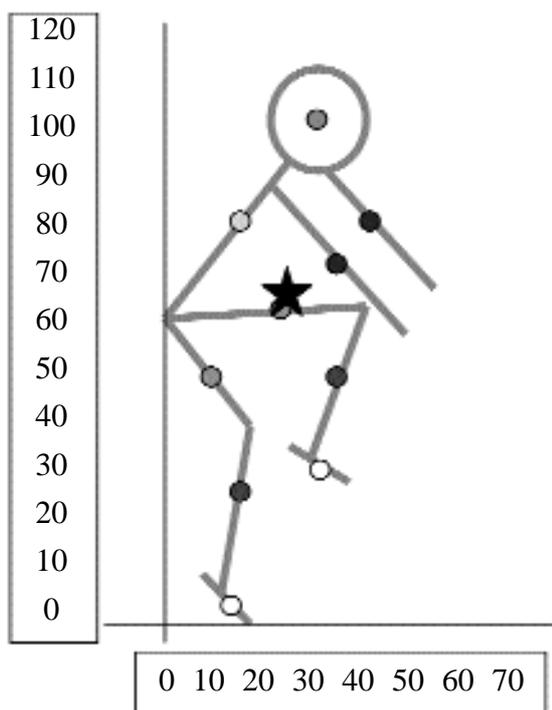
Miembro	Masa (Kg)	Longitud (cm)	Posición del c.d.m.
Cabeza y cuello	5,3	24	(30,105)
Tronco	29	55	(15,85)
Brazo y mano derecha	2,75	68	(35,75)
Brazo y mano izquierda	2,75	68	(42,85)
Muslo derecho	6	38	(10,50)
Muslo izquierdo	6	38	(25,65)
Pierna derecha	3,25	48	(15,27)
Pierna izquierda	3,25	48	(35,52)
Pié derecho	0,85	26	(12,5)
Pié izquierdo	0,85	26	(32,33)

Podemos ahora calcular las coordenadas del centro de masas de la ciclista, como si de un sistema de partículas se tratara:

$$X_{cm} = (\sum x_i m_i) / \sum m_i = 1215,65/60 = 20,26$$

$$Y_{cm} = (\sum y_i m_i) / \sum m_i = 4080,55/60 = 68$$

Si lo señalamos en el diagrama resulta:



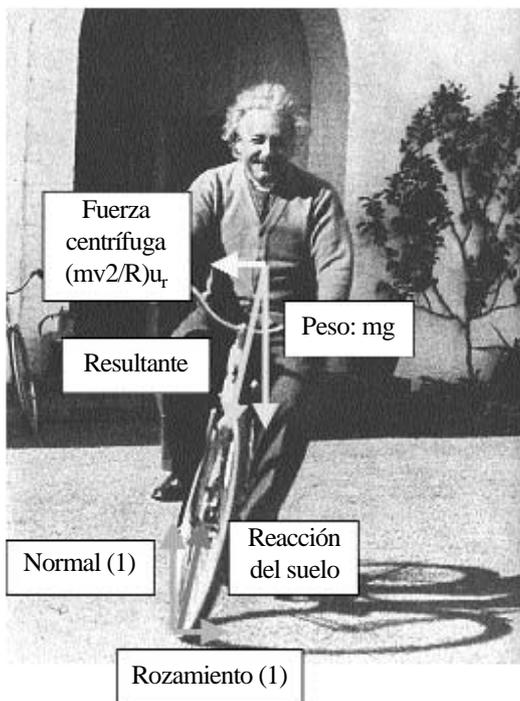
Dejamos como ejercicio el cálculo del centro de gravedad del sistema bicicleta-ciclista. En general depende de la configuración del ciclista, de la clase de bicicleta y del modo de conducción (más o menos inclinado sobre el manillar). Suele estar en el eje vertical de la bici, y sobre la barra horizontal superior (en una bicicleta de caballeros).

## ¡Que venga el arquitecto inmediatamente!

Se cuenta de aquel alcalde que había encargado un velódromo municipal para que la gente del pueblo pudiera practicar el ciclismo. Cuando lo vio terminado ordenó que arrestaran al arquitecto y que no lo dejaran salir del pueblo hasta que no enderezara las pistas que le habían salido inclinadas con el consiguiente peligro para los mozos.

Disculpamos a este ficticio e inexistente alcalde, porque para acceder al consistorio no es necesario saber un poco de física, pero ello nos da pie para hablar del equilibrio de fuerzas que existe en la bicicleta cuando tomamos una curva.

Es bien sabido que cuando un móvil toma una curva, cambia la dirección del vector velocidad lineal. Pero todo cambio en la velocidad (aunque sea en la dirección) supone una aceleración, y toda aceleración es debida a una fuerza. Esta fuerza que aparece cuando tomamos una curva es una fuerza de inercia llamada centrífuga, que es tanto mayor cuanto lo es la masa del ciclista y su velocidad, y cuanto menor es el radio de la curva. Su dirección es siempre radial (en la dirección del radio de la trayectoria) y su sentido hacia fuera de la curva. Esta fuerza es la causante de que tengamos que inclinarnos con la bicicleta en el mismo sentido del giro que

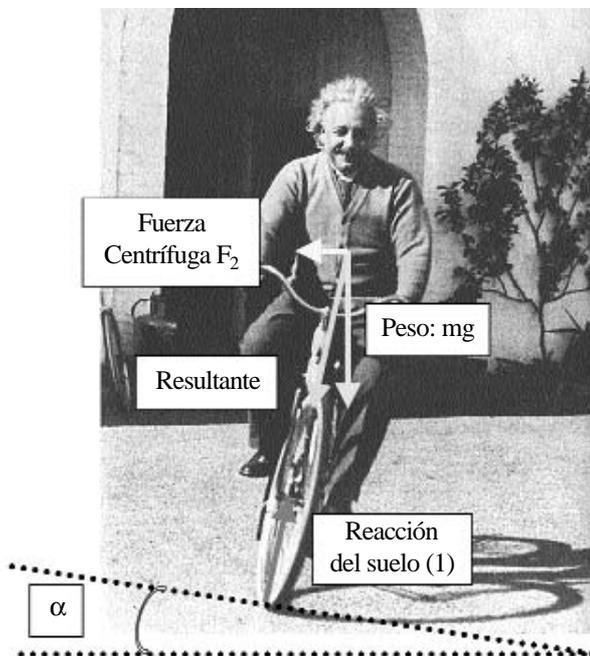


realizar. Para ilustrarlo hemos recurrido de nuevo a la fotografía de Einstein en su bicicleta, dibujando algunas de las fuerzas que actúan sobre él en el giro que está realizando hacia su izquierda. Se ha dibujado sólo la reacción del suelo sobre la rueda delantera, pero sobre la rueda trasera evidentemente actúan fuerzas similares. La fuerza centrífuga tiene la dirección  $\mathbf{u}_r$  (vector unitario radial), el peso tiene la dirección de la gravedad (hacia el centro de la tierra), y hemos llamado  $v$  al módulo de la velocidad de la bicicleta y  $R$  al radio de la curva que describe. En cuanto a la reacción con el suelo, posee una componente perpendicular al mismo (Normal), y una componente horizontal debido a la fricción entre el neumático y el suelo (Rozamiento).

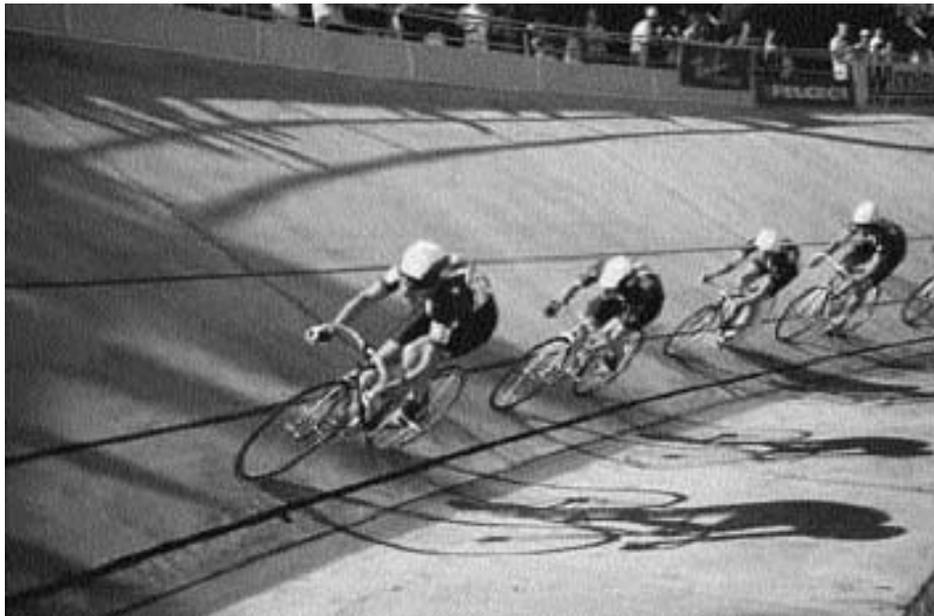
Einstein se inclina a su izquierda para que la Resultante Peso-Fuerza centrífuga se dirija exactamente a la línea que une los dos puntos de contacto de los neumáticos con el suelo, y de esta forma dicha resultante se cancela con las reacciones del suelo en las ruedas.

Esta cancelación de fuerzas que impide que la fuerza centrífuga nos expulse de la curva se consigue bien inclinando la bicicleta, bien inclinando la pista mediante un peralte. En este caso es la inclinación del suelo la que propicia que la resultante Peso- $F_c$ , se encuentre con las reacciones de la pista en su misma dirección, cancelándose mutuamente. Esto es lo que se suele hacer en los velódromos, donde existen curvas de poco radio y los ciclistas alcanzan grandes velocidades (recordemos que  $F_c$  aumenta con el cuadrado de la velocidad), originándose grandes fuerzas centrífugas que exigirían inclinaciones de la bicicleta imposibles, o con gran riesgo de patinar.

Vamos a ponerle un peralte artificial a don Alberto:



En este caso sería el propio peralte  $\alpha$  quien facilitaría que la Resultante y las reacciones con el suelo de las ruedas delantera y trasera, se cancelaran entre sí, coincidiendo en dirección pero con sentidos contrarios. Se facilita de este modo la estabilidad de la bicicleta en las curvas, evitando los indeseables derrapajes. Esta técnica no sólo se utiliza en los circuitos de competición, sino que también se emplean en las curvas cerradas de las carreteras convencionales.



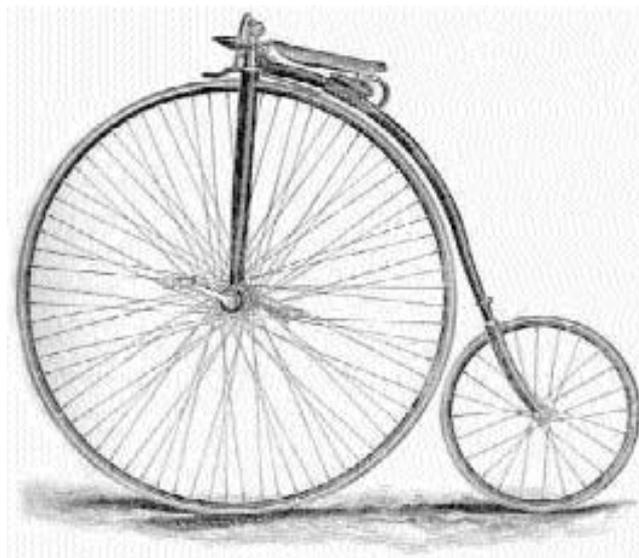
**Como coja yo al que me ha hecho el velódromo torcido...**



**Las bicicletas son para el verano...es una película.**

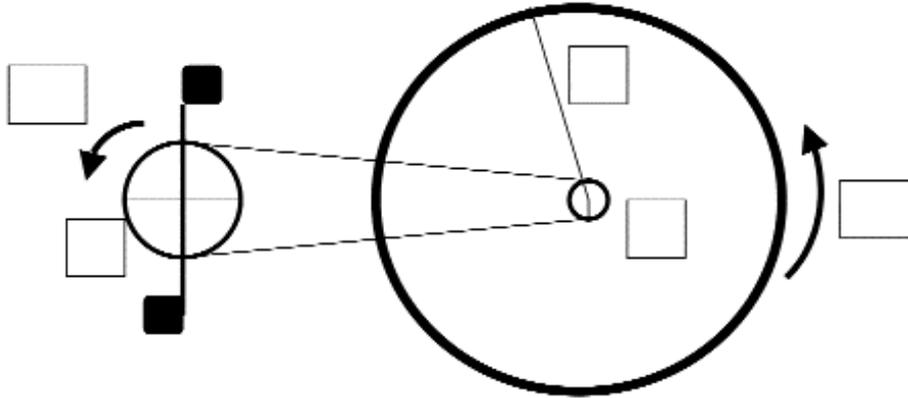
## ¡Que gran invento de Leonardo!

Al margen de la polémica sobre el supuesto diseño, verdadero o no, de la bicicleta de **Leonardo da Vinci**, de lo que no nos cabe duda es que la idea de la cadena de transmisión que hoy utilizan las bicicletas, está ya en un apunte suyo del **Códice de Madrid**, fechado en **1493**. Como la mayoría de los diseños de Leonardo, éste no llegó a materializarse y hubo que esperar hasta que en **1879 Harry J. Lawson** dota a la bicicleta de una cadena sin fin que transmitía la rotación de una rueda dentada a otra, dando la bicicleta un paso de gigante y revolucionario en la conquista de su configuración actual. Hacia **1860 Pierre y Ernest Michaux** idearon poner unos pedales que actuasen directamente sobre la rueda delantera a través de unas bielas, como ocurría en el **velocípedo**, cuya imagen mostramos a continuación:



Sin embargo el avance del velocípedo se limitaba a una vuelta por giro completo de los pedales (de ahí que la rueda delantera motriz tuviera 1,5 metros de diámetro que suponía 4,7 metros de avance por vuelta del pedal). Y el artilugio presentaba además otros inconvenientes dinámicos. Por un lado al girar el manillar, giraba la rueda delantera con los pedales puestos, y el ciclista no ganaba para curarse las rozaduras. Y es fácil imaginarse que para frenar había que lanzarse al vacío desde semejante altura, y primero caías tú, y después se te venía encima el velocípedo. En fin, que no nos arrendaban las ganancias. Era preciso encontrar un buen grado de acuerdo entre tres necesidades básicas: estabili-

dad, velocidad, frenado. Todo lo resolvió de un plumazo y de forma elegante la cadena de transmisión. La idea en síntesis era la siguiente: se reduce el radio de la rueda delantera para que sea igual que la de atrás. El manillar de dirección actuará sobre la rueda delantera dejando que sea la trasera la motriz, aumentando la estabilidad y la comodidad. Los pedales actúan sobre un plato que a través de la cadena transmite el movimiento a un piñón dentado solidario con la rueda trasera. Además escogiendo bien los radios del plato y del piñón, podemos conseguir que, con una cómoda cadencia de pedaleo, la bicicleta se desplace con cierta velocidad, que se puede ver aumentada o reducida en función de la elección de esos parámetros. Podemos ilustrar la relación entre la cadencia de pedaleo y la del giro de las ruedas con la siguiente gráfica:



La velocidad lineal del plato y del piñón (con sus periferias solidarias por la ligadura de la cadena), es la misma. Dicho en forma cinemática, se debe cumplir que:

$$\omega_1 r_1 = \omega_2 r_2$$

De donde:

$$\omega_2 = \omega_1 (r_1 / r_2)$$

Y como  $r_1 > r_2$  la velocidad angular del piñón trasero y de la rueda trasera  $\omega_2$  (que al ser solidarias es la misma), será mayor que la velocidad angular  $\omega_1$  con la que giran los pedales. Podemos mediante un sencillo cálculo hallar la velocidad lineal de la bicicleta  $V$ , y el espacio recorrido por ésta en un giro completo de los pedales,  $S$ .

$$V = \omega_2 R; S = 2 \pi R (r_1 / r_2) \text{ metros que avanza la bicicleta en cada vuelta del plato.}$$

Tanto el plato como el piñón son ruedas dentadas. El tamaño de los dientes es el mismo para ambos, aunque el plato suele tener más dientes que los piñones. Esto hace que la rela-

ción que existe entre el número de dientes del plato  $n_1$  y el número de dientes del piñón  $n_2$ , coincida con la relación ente sus respectivos radios  $r_1 / r_2$ :

$$n_1 / n_2 = r_1 / r_2 = N$$

Las bicicletas convencionales de carretera suelen tener dos platos de 53 y 43 dientes respectivamente, y un juego de 6 piñones en el que el mayor tiene 23 dientes y el pequeño 12. La pareja plato-piñón elegido, marca lo que se suele denominar desarrollo, si bien el vocablo también designa el espacio que la bici recorre en cada pedalada. Así para subir una fuerte pendiente pondremos un 43/23, mientras que a la hora de realizar un sprint meteremos un 53/12. Si la rueda de nuestra bicicleta tiene un radio de 34 cm, la distancia recorrida en una pedalada para el primer caso será:

$$(43/23) \times 2 \times 3,1416 \times 0,34 = 4 \text{ metros}$$

Mientras que en el segundo supuesto sería:

$$(53/12) \times 2 \times 3,1416 \times 0,34 = 9,44 \text{ metros}$$

Las bicicletas de montaña poseen aún un tercer plato más pequeño y un juego de 8 piñones, algunos muy grandes, que posibilitan subir fuertes pendientes sin esfuerzo, incrementando el ritmo del pedaleo, y avanzando pocos metros cada vez.

## ¡Dadme un punto de apoyo, y os moveré la Tierra!

**Arquímedes** fue un gran inventor. Todos conocemos cómo logró descubrir al joyero ladrón aplicando su famoso **principio de la hidrostática**. También a él se le atribuye la famosa frase que da título a esta propuesta. En ella late lo que históricamente se llamó **ley de la palanca**, que atañe a los momentos de las fuerzas, y que fundamenta toda **la dinámica de la rotación**.

Si queremos desplazar un sillón en línea recta, es preciso hacer una fuerza que venza el rozamiento con el suelo: las fuerzas son las responsables de la dinámica de la traslación. Pero si lo que queremos es abrir una puerta, es necesario que además de la fuerza, ésta sea aplicada a una distancia del eje de giro. Es decir para un giro de un sólido rígido necesitamos un momento (fuerza-distancia), siendo éstos los causantes de la dinámica de la rotación.

La ecuación fundamental de la dinámica de la traslación, y de la cual se deducen todas las demás leyes y principios que rigen la traslación es la 2ª ley de Newton, cuya formulación matemática más habitual es:

$$\Sigma F = ma \quad (1)$$

Una forma de leer dicha ley sería: fuerzas a favor del movimiento, menos fuerzas en contra del movimiento igual a masa por aceleración.

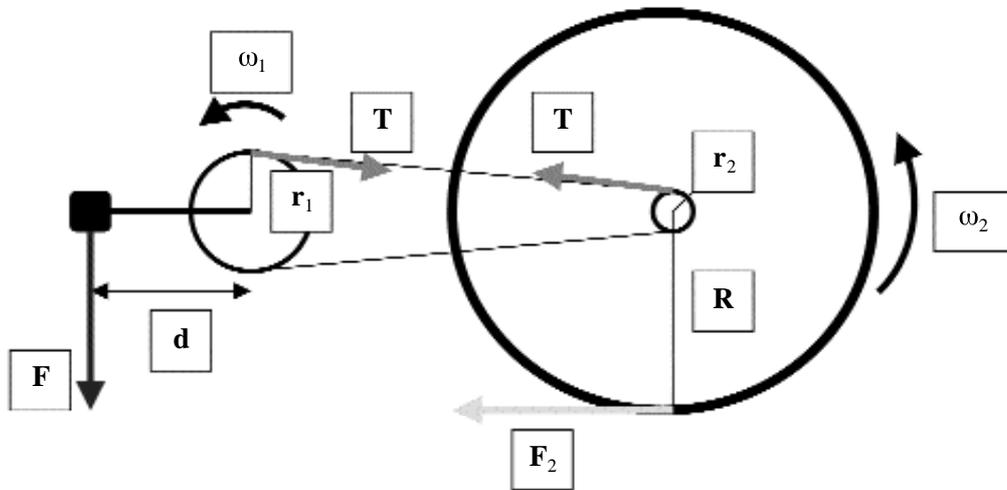
Análogamente la ecuación fundamental de la dinámica de la rotación vendría a decir: momento a favor del giro, menos momentos en contra del giro es igual al momento de Inercia respecto al eje de giro (es lo equivalente a la masa en la traslación), por la aceleración angular con la que gira el cuerpo

$$\Sigma M = I\alpha \quad (2)$$

La bicicleta se mueve tanto en el ámbito de la dinámica de la traslación como de la rotación. Sobre ella actúan muchas fuerzas y muchos momentos, y en esta ocasión vamos a fijarnos en estos últimos.

Estamos interesados sobre todo en estudiar cómo la bicicleta transmite la fuerza que se hace perpendicularmente al pedal  $\mathbf{F}$ , a través del plato, de la cadena y del piñón, a la rueda trasera, y que hemos llamado  $\mathbf{F}_s$ . El cociente entre ambas, medirá de alguna forma la eficacia de la bicicleta como máquina compuesta.

En la figura hemos llamado  $d$  al brazo del pedal (biela),  $r_1$  al radio del plato,  $r_2$  al del piñón y  $R$  al de la rueda. Hemos llamado  $T$  a la tensión de la cadena, que debe ser la misma a la salida del plato y a la entrada del piñón, pues de lo contrario se rompería.



Para mayor facilidad, vamos a trabajar con condiciones inerciales, sin que exista aceleración. En este caso la ecuación (2) queda  $\Sigma M = 0$ , que si lo aplicamos al plato resulta:

$$\text{Momento motriz } (F d) - \text{Momento en contra } (T r_1) = 0; \text{ es decir: } F d = T r_1 \quad (3)$$

Mientras que para el sistema piñón rueda, la ecuación fundamental de la dinámica de la rotación exige que se cumpla que:

$$T r_2 = F_s R \quad (4)$$

De (3) y (4) es inmediato deducir el cociente entre la fuerza de salida  $F_s$ , y la fuerza ejercida en el pedal  $F$ :

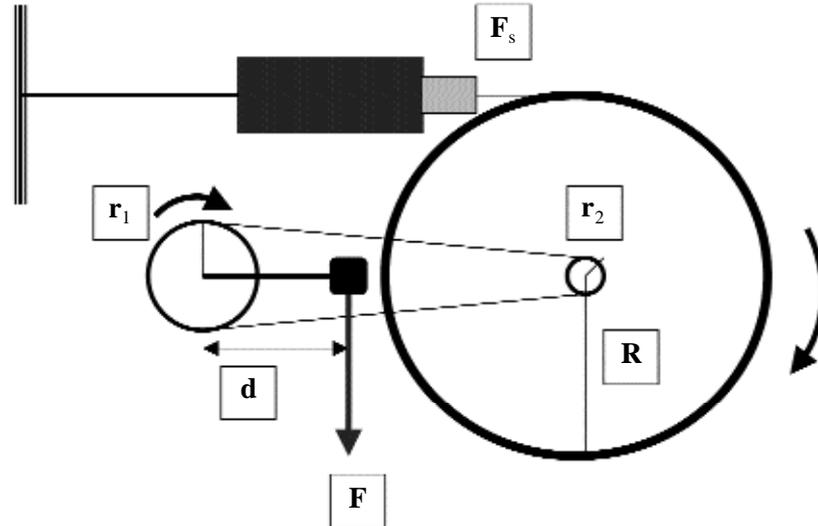
$$F_s / F = (r_2 d) / (r_1 R) \quad (5)$$

Por tanto la fuerza que ejercen los pedales puede transformarse en una igual, mayor o menor, en la rueda trasera, sin más que elegir una combinación adecuada para los radios del plato y del piñón (ya que la longitud de la biela y el radio de la rueda son constantes en cada bicicleta). En general la fuerza de salida  $F_s$  suele ser mayor que la ejercida en los

pedales, convirtiéndose la bicicleta en una máquina compuesta que multiplica el esfuerzo inicial. Pero como el ciclista en ocasiones debe enfrentarse a dificultades como fuertes subidas del terreno, viento en contra, o cansancio excesivo, es importante disponer de la posibilidad de encontrar una relación adecuada del cociente calculado  $F_s / F$ , que nos permita afrontar esas eventualidades con el esfuerzo muscular adecuado. Esto se consigue con el llamado **cambio**, tanto de platos como de piñones. Su fundamento es jugar en la expresión (5) con diferentes  $r_2$  (radio del piñón) y diferentes  $r_1$  (radio del plato) para conseguir un cociente  $F_s / F$ , cómodo de pedalear y eficaz. Mediante el cambio, el ciclista puede escoger entre diferentes platos y piñones mediante una sencilla palanca, movida por los dedos, que actúa sobre un desviador.

Proponemos ahora montar en el laboratorio un dispositivo que nos permita calcular el cociente (5). Para ello necesitaremos dos dinamómetros, un juego de pesas, cinta métrica, cuerda y una argolla.

Ponemos la bicicleta ruedas arriba, apoyada sobre el suelo en el sillín y el manillar. A la rueda trasera, le atamos en su periferia la argolla que nos servirá de enganche para un dinamómetro. Las pesas las utilizaremos para ponerlas sobre un pedal cuyo eje está situado paralelo al suelo, de esta forma podemos saber la fuerza motriz que ejerce el pedal sobre la cadena.



Según la expresión (5):  $F_s / F = (r_2 d) / (r_1 R)$ , el brazo del pedal  $d$  y el radio de la rueda  $R$  son constantes en la bicicleta, y podemos medirlos con facilidad. En cuanto al cociente  $r_2/r_1$  dependerá del plato y del piñón que elijamos en la bicicleta, pero ya sabemos que mejor que medir el radio (medida no exenta de cierta incertidumbre), podemos contar el número de dientes, dividiendo el del piñón, entre el número de dientes del plato. Podemos así obtener un valor teórico que después podemos refrendar con el experimental, sacando conclusiones. La medida se puede repetir con distintos desarrollos de platos y piñones, y con distintas fuerzas motrices  $F$ .

## El indeseable rozamiento

Hay preguntas que a muchos nos gustaría saber: ¿Hay muchas pérdidas energéticas en una bici? ¿El rozamiento es bueno, o es malo? ¿Gasta mucho una bicicleta? ¿Quién mató a **Billy el Niño**<sup>(1)</sup>? ¿Eh? De todo ello vamos a hablar a continuación.

Las fuerzas de rozamiento aparecen siempre que dos superficies estén en contacto. De ellas sabemos, entre otras cosas, que siempre se oponen al posible movimiento (¿os imagináis una fuerza de rozamiento que ayudara al cuerpo a moverse?), que son directamente proporcionales a la fuerza que acerca las superficies entre sí (la famosa normal, o fuerza pegamento, como yo la llamo), y que varía dependiendo de la naturaleza de los materiales (dependencia que recoge el también famoso coeficiente de rozamiento  $\mu$ ), y así el rozamiento de un objeto metálico es distinto si desliza por una pista de hielo, o por un papel de lija. Sin embargo es curioso constatar que en general el rozamiento es menor si los materiales que friccionan son distintos (las bolas de los rodamientos son de distinta materia que el eje, etc.) y que no depende ni de la extensión de las superficies en contacto. Todo ello se materializa en la expresión de todos conocidas:  $F_r = \mu N$ . También sabemos que existe una fuerza de rozamiento estática (la que hay que vencer para que se inicie el movimiento), y otra dinámica (para que el cuerpo continúe moviéndose). La primera es siempre mayor que la segunda.

Sin las fuerzas de rozamiento una bicicleta no podría moverse. Ocurriría que al pedalear, patinaríamos continuamente sobre el suelo, como ocurre cuando las ruedas se ponen sobre unos rodillos. Además gracias al rozamiento los frenos son capaces de detener la bicicleta. Por tanto una primera conclusión es que si bien las fuerzas de rozamiento siempre restan eficacia al movimiento, son absolutamente necesarias para el propio movimiento. Sin embargo el rozamiento siempre supone una pérdida de energía que hay que combatir y minimizar. Como se deben a las irregularidades de las superficies que friccionan, una manera de paliarlo es rellenar esas irregularidades con lubricantes que faciliten el deslizamiento. Por eso en una bicicleta es esencial la lubricación y engrase de las piezas móviles que contactan entre sí: ejes, cojinetes, cadena, etc.

---

(1) Hace ya casi 120 años que **Billy The Kid** murió. Algunos hablan de su cuerpo sangrante en los brazos de su amante mexicana quien, mirando fijamente a los ojos de su asesino -el sheriff **Pat Garret**- le dijo: “**ni siquiera tuviste el coraje de tirarle de frente**”.

Existe el llamado rozamiento por deslizamiento, y el de rodadura. El rozamiento por rodadura es del orden de treinta veces inferior al de deslizamiento. Por eso la rueda es uno de los mayores inventos de la humanidad, y no nos podemos hacer una idea de que ahorro energético ha supuesto a lo largo de la Historia. En la bicicleta, cuando se puede se evita el deslizamiento convirtiéndolo en rodadura, esa es la razón de ser de los **rodamientos** que encontramos en tantas partes de la bicicleta: eje de dirección, pedalier, ejes de las ruedas...El rozamiento por rodadura depende de forma directa del peso, e inversamente del diámetro de las ruedas: unas ruedas mayores absorben mejor las irregularidades del terreno. También influye evidentemente el tipo de neumático y su presión.

El contacto de la bicicleta con el suelo son sólo dos **puntos**: los apoyos de las ruedas. De ellos interesa que el rozamiento por deslizamiento sea **brutal** (para no patinar), y que no encontremos mucha oposición para el rodar de la bicicleta. Lo primero se consigue utilizando caucho para los neumáticos (gran coeficiente de rozamiento  $\mu$  con el suelo), y se evidencia cuando al frenar en seco, cesa la rodadura para convertirse en deslizamiento, consiguiendo parar la bici en escasos metros (aquí nos está interesando aprovecharnos del rozamiento). Lo segundo se logra sabiendo que el rozamiento por rodadura es inversamente proporcional al radio de la rueda, por eso, entre otras cosas, las ruedas tienen un tamaño generoso. A veces, si hay gravilla suelta en la calzada, al frenar la bicicleta patina. La explicación física la encontramos en el hecho de que las pequeñas piedrecillas actúan como imperfectas bolas de rodamiento, haciendo que cese el rozamiento por deslizamiento, y aparezca el de rodadura, que al ser tan pequeño, no detiene la bicicleta, teniendo lugar el derrapaje.

La bicicleta es ejemplar en esto de minimizar rozamientos cuando interesa, y aprovecharse de ellos cuando conviene. Para comprobarlo basta hacer rodar, impulsándola con fuerza, una rueda bien centrada y lubricada y fijarse en el tiempo que el rozamiento tarda en pararla. Esta sencilla experiencia además nos ilustra de alguna forma la primera ley de **Newton** o **Principio de inercia**. La rueda continuaría indefinidamente moviéndose si no existieran las fuerzas de rozamiento. La lucha contra el rozamiento disipativo de energía, ha hecho de la bicicleta una de las máquinas más eficientes que existen, envidiable a la hora de aprovechar los recursos energéticos y optimizarlos. Esta característica ha sido siempre objeto de fascinación por parte de físicos e ingenieros. Pensemos por un momento en los kilómetros que recorren a diario los ciclistas profesionales, y las velocidades medias que obtienen, o en la distancia que podría recorrer en un día un ciclista de fondo. ¿Cuánto combustible consumiría un vehículo motorizado recorriendo lo mismo?

Podemos intentar calcular de manera aproximada la fuerza de rozamiento que actúa en el eje de una rueda delantera de la bicicleta. Para ello pongamos de nuevo nuestra bici ruedas arriba. Señalamos con una tiza un punto del neumático, y hacemos girar

libremente la rueda. Cuando lo consideremos oportuno, empezamos a contar simultáneamente el número de vueltas que da la rueda y el tiempo hasta que la rueda se para completamente. Estos serán nuestros datos de partida, el ángulo total descrito por la rueda y el tiempo empleado en pararse.

La rueda gira con un movimiento circular uniformemente retardado, y las ecuaciones linealmente independientes, que gobiernan dicho movimiento son:

$$\varphi = \varphi_0 + \omega_0 t + 1/2 (\alpha t^2) \quad (1)$$

$$\omega_f = \omega_0 + \alpha t \quad (2)$$

En donde conocemos  $\varphi_0$  (ángulo inicial recorrido = 0),  $\omega_f$  (velocidad angular final = 0)  $\varphi$  (ángulo recorrido =  $2\pi \times n^\circ$  de vueltas radianes), y  $t$ . (1) y (2) constituyen un sistema de dos ecuaciones con dos incógnitas  $\omega_0$  y  $\alpha$ . Estamos interesado sobre todo en la aceleración angular  $\alpha$ , que como corresponde a un movimiento retardado, nos saldrá negativa.

Necesitamos ahora calcular el momento de inercia de la rueda delantera ( $I$ ), respecto del eje de giro, y para ello vamos a considerar que toda la masa de la rueda se concentra en la llanta. Si medimos la masa de la rueda y su radio, podemos estimar el valor aproximado de  $I$  ( $I = MR^2$  para un aro). Si quisiéramos precisar aún más, necesitaríamos conocer la masa de la periferia (neumático + llanta), de los radios y del buje central. Componiendo momentos de inercia llanta = aro, radio = varilla, buje = cilindro, podríamos hacer un cálculo más realista. Habría que tener en cuenta entonces que los radios giran respecto a uno de sus extremos.

Una vez que tenemos  $I$  y  $\alpha$ , la ecuación fundamental de la rotación  $\tau = I \alpha$ , nos permite hallar el valor del momento de la fuerza de rozamiento sobre el eje. Estimando el radio del eje contenido en el buje, podemos hacernos una idea aproximada del valor de la fuerza de rozamiento que detiene la rueda. Evidentemente para cada rueda será distinta, pues depende de la masa, tamaño y forma de la rueda, del grado de engrase del eje, del centrado de la rueda, etc.

También podemos realizar una experiencia para medir el rozamiento total que actúa sobre un ciclista y su máquina. En este sentido hay que precisar que habrá fundamentalmente dos clases de rozamiento: mecánico y aerodinámico. En el rozamiento mecánico influirá el peso del conjunto ciclista-bicicleta, la fricción de la cadena y el rodamiento de los cojinetes (ruedas, pedales, bielas...). También influirá el rozamiento por rodadura de las ruedas con el suelo, que dependerá de la del estado y clase de neumáticos utilizados,

de la presión de hinchado y del terreno por donde rueda la bici: asfalto, grava, cemento, barro...

En una recta generosa, que no tenga desniveles, dibujamos una línea de salida. Pedaleamos antes de la salida, de tal forma que antes de pasar por ella dejemos de pedalear, es decir iremos en la llamada **rueda libre**, y con una velocidad moderada para minimizar el rozamiento por el aire. Medimos el tiempo empleado hasta que la bicicleta se detiene, así como la distancia que ha recorrido.

Del sistema de ecuaciones del movimiento rectilíneo uniformemente retardado que posee la bicicleta conocemos, como en el caso anterior, todas las variables que nos permiten calcular la aceleración negativa del movimiento (espacio total, tiempo y velocidad final nula). Multiplicando dicha aceleración por la masa del conjunto ciclista-bicicleta, tendremos la fuerza de rozamiento total que ha actuado sobre el sistema. Sin embargo, existe cierta ambigüedad a la hora de decidir cuándo la bicicleta se ha detenido, pues depende de la habilidad del ciclista para mantener el equilibrio en los últimos metros.

Si la bicicleta posee velocímetro (ya de uso casi generalizado), podemos ensayar otra estrategia consistente en anotar la velocidad inicial y la final entre dos trazos marcados en el suelo cuya distancia medimos, o cronometrar el tiempo transcurrido desde que el velocímetro marca una velocidad inicial  $v_o$  hasta una velocidad final  $v_f$ . Insistimos en la conveniencia de que no sean velocidades elevadas, y que la experiencia se realice sin pedalear. En este caso la aceleración del movimiento será:  $a = (v_f - v_o) / t$ .

Para calcular la fuerza neta de rozamiento basta con multiplicar por la masa ciclista-bicicleta:  $F_r = m a$ . El valor negativo que obtenemos indica que es una fuerza de frenado. Una manera de compensar los pequeños desniveles que pudiera tener el terreno, y de asegurar más la fiabilidad de las medidas, sería repetir la experiencia varias veces una vez en un sentido y la siguiente en el contrario. A modo orientativo diremos que las fuerzas de rozamiento mecánico para una bicicleta de carreras suele ser del orden de 3 Newtons, mientras que para una de paseo suele rondar los 5 o 6 N.

Evidentemente si conocemos el coeficiente de rozamiento dinámico de rodadura, podemos calcular con facilidad la fuerza de rozamiento debida al contacto de las ruedas con el suelo. En un terreno llano dicha fuerza sería:

$$F_r = \mu_r N = \mu_r mg$$

Mientras que en una cuesta de  $\alpha$  grados de inclinación valdría:

$$F_r = \mu_r N = \mu_r mg \cos \alpha$$

Los valores de coeficientes de rozamiento por rodadura para bicicletas, dependen del tipo de neumático, de su estado, y sobre todo del terreno por el que se rueda. Para asfalto y neumáticos convencionales un valor razonable puede ser 0,005.

## Como en un submarino

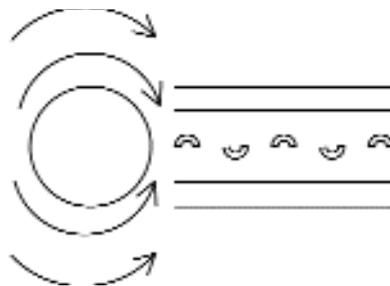
Vivimos en el fondo de un océano de aire. Somos, en cierto sentido, como buzos que siempre nos desplazamos en el seno de un fluido menos denso que el agua, pero con características de algún modo similares. Por supuesto que cuando vamos en bicicleta ocurre igual (como un submarino sumergido en un gas), y hemos de enfrentarnos con la resistencia que nos ofrece el aire: el rozamiento aerodinámico.

El aire es un fluido de baja densidad (aproximadamente  $1,3 \text{ kg/m}^3$  para temperaturas habituales) si lo comparamos con el agua ( $1000 \text{ kg/m}^3$ ), sin embargo su fricción supone la mayor fuerza de rozamiento que afecta a un ciclista. Si no existiera rozamiento aerodinámico, una bicicleta convencional llegaría a alcanzar velocidades fabulosas sin un gran derroche de energía. Hasta una velocidad aproximada de  $15 \text{ km/h}$  (siempre hablamos de velocidad relativa del aire respecto a la bicicleta), el rozamiento mecánico y el aerodinámico no difieren mucho. A los  $40 \text{ km/h}$ , el aerodinámico es del orden de 6 veces superior al mecánico, y a  $50 \text{ km/h}$ , es en torno a 11 veces superior. A medida que la velocidad aumenta, el rozamiento aerodinámico se dispara (veremos que es directamente proporcional al cuadrado de la velocidad), y prácticamente resulta una barrera infranqueable. Pero hasta llegar a esa barrera, la Física y la Ingeniería le plantan batalla, e intentan diseñar estrategias que minimicen estos efectos de frenado: cascos aerodinámicos, manillares ergonómicos, ruedas lenticulares, maillots de fibras especiales... Posiblemente sea aquí, en la lucha contra el rozamiento aerodinámico, donde podemos aún arañar algún ápice de mayor rendimiento en los diseños de las nuevas bicicletas. Esto sin duda es mucho más importante que restarle unos gramos al peso de la bicicleta, descubriendo nuevos materiales. La imagen que ofrecen los corredores profesionales del Tour, del Giro, de la Vuelta, sobre todo en las contrarrelojes, bien podría servir de modelo a cualquier película de Ciencia Ficción.

Cuando las moléculas de aire chocan con el ciclista, varían su cantidad de movimiento, y en virtud de la segunda ley de Newton, aparece una fuerza, una de cuyas componentes es perpendicular a la superficie. A medida que la velocidad del ciclista respecto del aire aumenta, la variación de la cantidad de movimiento de las moléculas de aire será mayor, y por ende la fuerza de oposición que ejercen sobre el ciclista. Por otra parte el deslizamiento de las moléculas también produce un importante rozamiento. A velocidades bajas el flujo de las moléculas de aire alrededor de un cuerpo es laminar (las moléculas van paralelas unas a otras) y en consecuencia el rozamiento es bajo. Ilustramos el régimen laminar en la siguiente figura:



Sin embargo, cuando la velocidad aumenta las capas de aire comienzan a separarse, el flujo laminar se vuelve inestable, dando paso al régimen turbulento que ilustramos en la siguiente figura:



En este régimen el rozamiento se incrementa de forma considerable, superando en 5 veces el del régimen laminar. Para mayor desgracia, aparece para velocidades muy habituales para los que pasean en bicicleta: entre los 15-20 km/h.

Veamos cómo podemos ingeniárnosla para hacer una experiencia donde podamos evaluar de alguna manera el valor de esta fuerza de rozamiento aerodinámica. Buscamos una cuesta sin curvas de la que conozcamos el valor de la pendiente. Sobre un ciclista que se encuentra en una pendiente actúa una componente del peso cuyo valor es  $F = m \cdot g \cdot \text{sen} \alpha$ , donde  $\alpha$  es el ángulo de la pendiente. Todo esto nos resulta muy familiar. Es el famoso plano inclinado que tantas veces nos han preguntado en los exámenes de Física. Bajamos ahora la pendiente **sin dar pedales**, dejamos que la bici gane velocidad hasta que ésta se estabilice, y nos fijamos en el velocímetro memorizando el valor que marque. Si la velocidad ya no aumenta y permanece constante, es por que la Fuerza total de rozamiento (mecánico y aerodinámico), ha igualado a la fuerza impulsora  $m \cdot g \cdot \text{sen} \alpha$ , verificándose:

$$m \cdot g \cdot \text{sen} \alpha = F_{ra} + F_{rm} \quad (1)$$

Donde  $F_{ra}$  es la fuerza de rozamiento aerodinámico, y  $F_{rm}$  la correspondiente al mecánico. Si conocemos la pendiente, conocemos el ángulo  $\alpha$ , y así por ejemplo una pendiente del 5 % supone que  $\text{tg } \alpha = 0.05$  que correspondería a un ángulo de  $2.86^\circ$ . Evidentemente el peso bicicleta-ciclista lo podemos medir con facilidad, y en cuanto al rozamiento mecánico hemos visto en la experiencia anterior cómo puede ser evaluado. Un valor bastante razonable para una típica bicicleta de montaña, puede estimarse en 4.5 N. Con estos datos, es fácil calcular el valor aproximado de la fuerza de rozamiento aerodinámico. Evidentemente sobra decir que la posición del ciclista en la bajada ha de ser siempre la misma, si repetimos la experiencia varias veces.

Otra forma de medir la oposición del viento es directamente a partir de la fórmula de la fuerza de rozamiento aerodinámica que experimenta un ciclista, cuya expresión es:

$$F_r = 1/2 C_r \rho S v^2 \quad (2)$$

Donde  $C_r$  es el llamado coeficiente de arrastre, de resistencia, o de forma (constante adimensional, en el caso de un ciclista vale en torno a 0.9).  $\rho$  es la densidad del aire ( $1.3 \text{ kg/m}^3$  a  $20^\circ\text{C}$ ),  $S$  el área frontal que presenta el ciclista (depende del tamaño del ciclista y de su posición), y  $v$  la velocidad relativa del aire con respecto a la bicicleta.

Podemos considerar por ejemplo un ciclista de unos 75 kg con una bicicleta de 10 kg, a una velocidad de 36 km/h (10 m/s). Si marcha en posición aerodinámica, con los brazos rectos, la superficie frontal que presenta  $S$  suele estar en torno a  $0,4 \text{ m}^2$ , entonces tendremos:

$$F_{ra} = 1/2 \times 0,9 \times 1,3 \times 0,4 \times 10^2 = 23,4 \text{ N}$$

Si consideramos ahora que las ruedas tienen un coeficiente de rozamiento por rodadura de 0,005, podemos calcular la fuerza de rozamiento mecánico debida al rodar (consideramos que el terreno es llano):

$$F_{rm} = \mu_r N = \mu_r mg = 0,005 \times 85 \times 9,8 = 4,17 \text{ N}^1$$

La fuerza total de rozamiento que debe vencer el ciclista es por tanto:

$$F_r = F_{ra} + F_{rm} = 23,4 + 4,17 = 27,57 \text{ N}$$

---

(1) También podemos calcular el rozamiento mecánico según vimos en el epígrafe anterior.

Si en la expresión (2)  $F_r = 1/2 C_r \cdot \rho \cdot S \cdot v^2$ , hacemos  $k = 1/2 C_r \cdot \rho \cdot S$ , y sustituimos los valores de  $C_r$ , por 0,9,  $\rho$  por 1,3 y  $S$  por 0,4, dicha expresión nos quedaría:

$$F_{ra} = 0,234 v^2$$

Igualdad que nos permite conocer la fuerza de rozamiento aerodinámico para cualquier velocidad.

Si ahora recordamos que la potencia a una determinada velocidad obedece a la expresión  $P = F \cdot v$ , tendremos finalmente que la potencia que un ciclista debe desarrollar para vencer el rozamiento aerodinámico a una determinada velocidad  $v$  es:

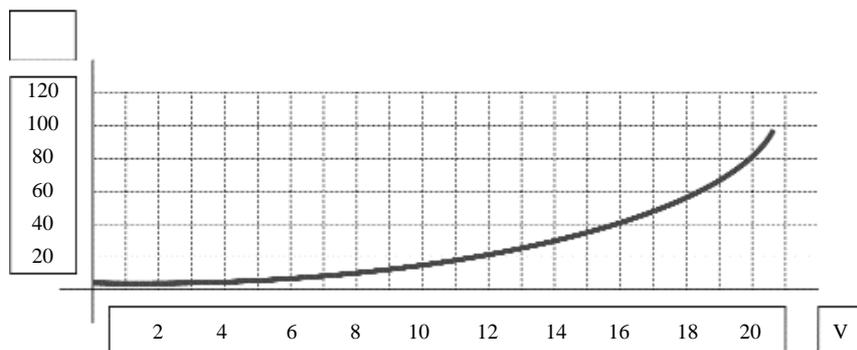
$$P = 0,234 v^3$$

Es decir la resistencia del aire es proporcional ¡al cubo de la velocidad! En las carreras de ciclismo, la lucha contra el rozamiento aerodinámico es crucial. Cuando se circula en pelotón los que tiran de él van en inferioridad de condiciones respecto a los rezagados que van chupando rueda, y beneficiándose de un menor rozamiento con el aire. Esta es la explicación de los famosos relevos, o de la formación en cuchilla, o de la prohibición de pedalear tras un coche o una moto. El coeficiente de resistencia del aire cuando se circula detrás de otro ciclista suele bajar de 0,9 a 0,5.

En el caso que hemos considerado de un ciclista de 75 kg, con una bicicleta de 10 kg, a una velocidad de 36 km/h (10 m/s) para mantener su velocidad constante venciendo tanto el rozamiento aerodinámico como el rozamiento mecánico debe desarrollar una potencia de:

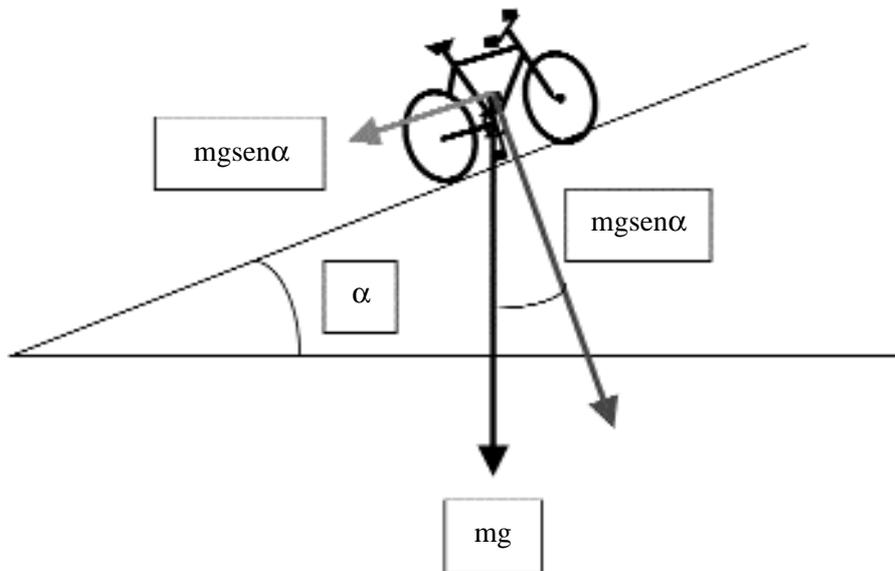
$$P = F_r v = 27,57 \times 10 = 275,7 \text{ w}$$

Con los datos obtenidos podemos representar en unos ejes coordenados cartesianos la variación de la fuerza de rozamiento neta (medida en Newtons), en función de la velocidad (medida en m/s).



## ¡Cuánto cuesta la cuesta!

Además de luchar contra el rozamiento los ciclistas deben enfrentarse con las pendientes. Todos hemos visto las caras de sufrimiento y los esfuerzos titánicos que hacen los corredores subiendo puertos como L'Alpe D'Huez o la subida a los lagos de Enol. La explicación física es evidente. En llano el peso se cancela con la reacción del suelo, que solemos llamar Normal. Pero al subir una pendiente el peso tiene una componente hacia abajo paralela a la carretera, que el ciclista debe de compensar. Lo vemos con más claridad en la siguiente gráfica:



Por tanto, un ciclista subiendo una cuesta, para mantener constante su velocidad, y prescindiendo del rozamiento aerodinámico y del mecánico, debe ejercer una fuerza de valor  $mg\text{sen}\alpha$ . Si la velocidad constante a la que sube es  $v$ , la potencia que el ciclista debe desarrollar sin rozamientos es:

$$P = F \cdot v = mg\text{sen}\alpha \cdot v \quad (1)$$

En la expresión anterior  $P$  y  $v$  cumplen las estrictas condiciones exigidas por el primer Teorema de **Contri**<sup>(1)</sup>, y así si la velocidad del ciclista aumenta, la potencia aumenta en un factor proporcional, de forma lineal.

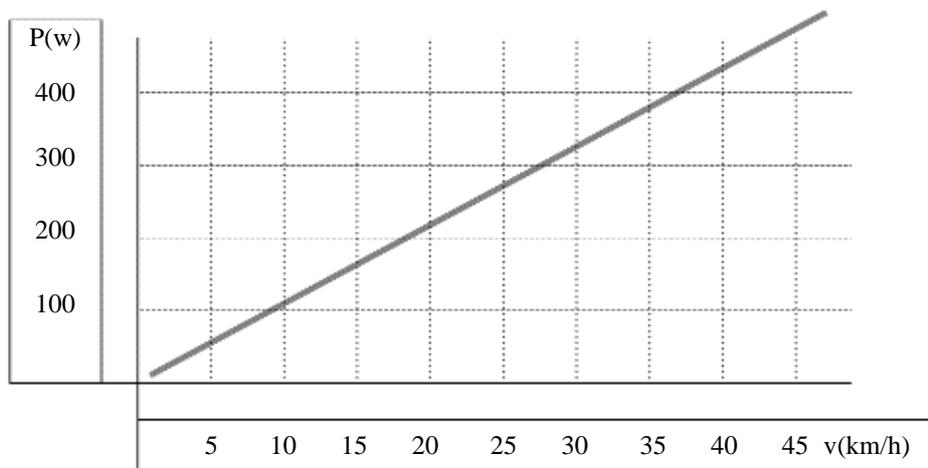
Pensemos por ejemplo en un ciclista de 75 kg, sobre una bicicleta de 10 kg, subiendo una pendiente del 5% a una velocidad de 36 km/h. La fuerza que debe ejercer para superar el factor pendiente será:

$$F = 85 \times 9,8 \times \text{sen}(\arctg 0,05) = 41,6 \text{ N}$$

Y debe desarrollar una potencia de  $P = 41,6 \times 10 = 416 \text{ w}$

Podemos representar en unos ejes coordenados cartesianos, la potencia necesaria que desarrollaría este ciclista de 75 kg de masa, sobre una bicicleta de 10 kg, subiendo una pendiente del 5%, en función de la velocidad que lleve. Insistimos en el hecho de que esta potencia sólo es para superar la pendiente, suponiendo que los rozamientos son nulos. La potencia se ha calibrado en watios, y la velocidad en km/h, que si bien no son unidades del Sistema Internacional (donde mediríamos m/s), es la forma más habitual de medir la velocidad de una bicicleta en el ámbito deportivo. Si quisiéramos convertir km/h en m/s bastaría con dividir por 3,6.

#### Potencia desarrollada para vencer una pendiente del 5% en función de la velocidad



(1) Este Teorema establece que dos magnitudes son directamente proporcionales si verifican que "**contri** más aumenta una, también más lo hace la otra". Existe un segundo Teorema de Contri, que atañe a las magnitudes inversamente proporcionales. No dudamos de que el sagaz lector será capaz de enunciarlo.

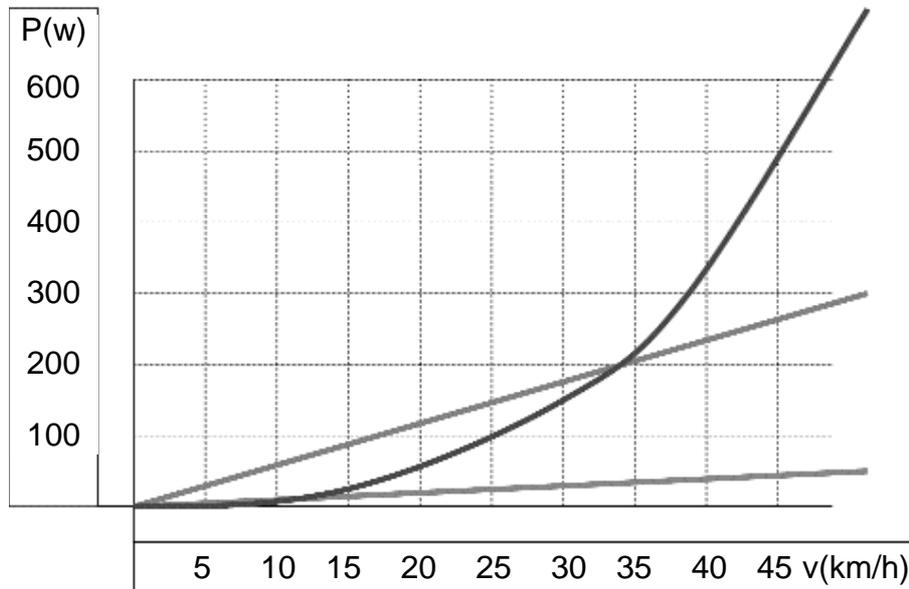
## ¿Consume mucho una bicicleta?

La bicicleta quizá sea la máquina que mejor optimiza la energía que se emplea en moverla. Es lo que llamamos una máquina muy eficaz con un gran rendimiento energético. La energía que el ciclista invierte en pedalear se convierte con un grado de eficacia asombroso en desplazamiento, minimizando las pérdidas energéticas. Es mayor el aprovechamiento de la energía en una bicicleta que en el caminar a pie. Quien camina ha de subir y bajar su centro de masas alternativamente, y esa variación sistemática de energía potencial, no se aprovecha para desplazarse. El ciclista en cambio sube y baja sus piernas, pero ese movimiento se invierte en energía cinética de rotación al plato, que a través de la cadena, piñones, etc. moverá a toda la bicicleta. El rendimiento energético de una bicicleta es del orden de 5 veces inferior al del caminante. De todos los medios de transporte humano, es el más económico en términos energéticos. Si comparáramos las calorías consumidas por kilómetro y por persona, el consumo menor corresponde al ciclista, le seguiría el caminante, después el corredor, le seguiría el ciclomotor y el transporte de personas por ferrocarril, después vendría un coche con 5 plazas ocupadas, le seguiría el jinete a caballo, el nadador, y por fin un coche con su conductor como único pasajero. Si en bicicleta gastamos 5 veces menos calorías que andando, la comparación con un coche es tremenda: con la energía consumida por un coche en recorrer 100 metros, un ciclista recorre más de 5 kilómetros.

En los capítulos anteriores hemos visto que el consumo energético del ciclista se utiliza en vencer el rozamiento mecánico (la menor parte), en subir pendientes (dependiendo del grado de inclinación), y sobre todo en superar la resistencia del aire que es el gran enemigo del ciclista. Entre el 70 y el 90% de la energía empleada se gasta en vencer el rozamiento aerodinámico. Si no existiera la fuerza del viento en contra, la bicicleta sería un medio de locomoción humana increíblemente poderoso. Evitando este tipo de rozamientos, las bicicletas pueden alcanzar velocidades superiores a las de los coches convencionales. En 1899 **Charley Murphy**, pedaleando tras una pantalla transportada por un tren, recorrió una milla en un minuto, superando la velocidad de los vehículos de su época. En 1972, **Allan Abbot** recorrió en su bicicleta una milla ¡a más de 225 km/h!, para ello antes de pedalear (222 dientes tenía el plato de su bicicleta), un coche lo remolcó hasta los 145 km/h. ¿Nos hacemos idea de lo que correríamos en bicicleta si no existiera rozamiento aerodinámico?

Si analizamos los resultados que hemos obtenido y los cálculos realizados en los capítulos anteriores, podemos calcular con facilidad la potencia que necesitamos para montar en bicicleta. En efecto, habíamos evaluado con anterioridad la potencia gastada en vencer el rozamiento mecánico y el aerodinámico, así como la potencia empleada en subir una

pendiente. Reunamos ahora todos esos datos en una sola gráfica. En ella vamos a representar la potencia desarrollada en función de la velocidad por un ciclista de 75 kg en una bicicleta de 10 kg. El trazo azul corresponde al rozamiento aerodinámico, el verde al rozamiento mecánico, y el rojo la potencia empleada en subir una pendiente del 2,5 %. Conviene hacer la salvedad que hemos supuesto que el rozamiento mecánico no es constante, y que depende de la velocidad mediante un factor constante aunque, como podemos observar en la figura, la pendiente de la recta verde es muy pequeña.



En la gráfica se pone de manifiesto que la potencia empleada en subir pendientes y en vencer el rozamiento mecánico, depende de la velocidad de forma lineal, mientras que la potencia para vencer el rozamiento aerodinámico depende del cubo de la velocidad, por eso a partir de 35 km/h se dispara. Si queremos saber la potencia total consumida para una determinada velocidad, basta con sumar las tres contribuciones.

Una persona normal que sale a pasear con su bicicleta, viajando por terreno llano a 20 km/h desarrolla una potencia inferior a 100 vatios (el consumo de una bombilla). Un ciclista profesional desarrolla potencias superiores a los 500 vatios (equivalente a la que emplea un taladro eléctrico). Un coche familiar desarrolla potencias del orden de los 100.000 vatios.

Por tanto ojo con las cuestas y con el viento. Si vas a subir a la sierra con tu bicicleta, y hace un *airazo de aquí te espero*, mejor que cambies de planes, y te vayas al cine.

## Una central no nuclear

La bicicleta es tan respetuosa con la energía, que incluso si tiene necesidad de utilizar energía no mecánica, ella misma se la fabrica. Además puesta a generar energía, elige una tan elegante y no contaminante como la energía eléctrica. En efecto la incorrectamente llamada **dinamo** (un nombre más apropiado sería alternador), es toda una central de producción de electricidad, con el mismo fundamento físico que la de cualquier central eléctrica, donde se genera la energía que llega a nuestros hogares.

El invento se debe a **Michael Faraday** (1791-1867). Hijo de un pobre herrero, Faraday fue aprendiz de encuadernador y se instruyó él mismo leyendo los libros que le traían para encuadernar. Se convirtió en el mayor científico británico de su tiempo, famoso por sus brillantes intuiciones y por sus populares discursos. Faraday descubrió que moviendo un imán cerca de un circuito eléctrico cerrado, o cambiando el campo magnético que pasa a su través, era posible “inducir” una corriente eléctrica que fluyera dentro de él. Esa “inducción electromagnética” quedó como principio de los generadores y de los motores eléctricos.

La dinamo de una bicicleta consta básicamente de un imán solidario mediante un eje a una rueda dentada, rodeado de un arrollamiento de espiras de cobre. La rueda dentada, mediante un resorte, puede ponerse en contacto con la llanta de la rueda, de tal manera que al girar ésta, el imán gira en el interior de las espiras de cobre, produciendo una corriente eléctrica. La corriente producida es alterna (de ahí que en vez de dinamo es más correcto decir alternador), esto es no tiene polo positivo ni negativo fijo, como ocurre en una pila, sino que la polaridad se va intercambiando en función de la velocidad con la que gire el imán.

Las leyes físicas que rigen el funcionamiento de la dinamo son básicamente las de **Faraday**, **Henry** y **Lenz**. En ellas se pone de manifiesto que un campo magnético variable, que atraviese la superficie engendrada por un conductor, crea una corriente eléctrica. Esta corriente será mayor cuanto más rápidamente varíe el flujo magnético a través de la superficie. Por eso la luz del faro de una bicicleta es más intensa cuanto más deprisa se mueve.

La expresión matemática de esta ley es:

$$\varepsilon = d\phi_m/dt$$

Donde  $\varepsilon$  es la fuerza electromotriz inducida (se mide en voltios),  $\phi_m$  es el flujo magnético (se mide en webers) y  $t$  el tiempo. El signo menos indica que la corriente inducida se opone a la variación de flujo que la produce.

Una curiosidad es que con frecuencia de la dinamo de la bicicleta sale un solo cable hacia la bombilla, cuando todos sabemos que para que circule una corriente eléctrica hace falta un circuito cerrado, y un cable sólo no lo es. El segundo cable de la dinamo es la propia bicicleta si su estructura es metálica. Es lo que en electricidad se denomina masa. Si la corriente generada por la dinamo fuera muy intensa esto no sería posible, pues la bici nos daría calambrazos considerables, pero la intensidad eléctrica que genera una dinamo es tan pequeña que para detectarla tendríamos que hacerlo con una zona del cuerpo super-sensible, como por ejemplo la lengua.

Con una simple dinamo de bicicleta podemos realizar muchas experiencias sobre electricidad y magnetismo: imantación por contacto, visualizar la geometría de las líneas de campo magnético, la interacción con imanes, etc. Y no digamos si disponemos de un polímetro, y de resistencias eléctricas. No olvidemos que la dinamo es una fuente de alimentación o generador eléctrico. Sin embargo para ceñirnos a utilizar sólo bicicletas, vamos a proponer una sencilla experiencia.

Realmente el genio creador de Faraday, de alguna manera debía verse recompensado. Y así fue: cuando inventó la dinamo, *por el mismo precio*, inventó el motor eléctrico, dispositivo esencial que supuso un paso de gigante en la historia del progreso humano. Y es que la cosa es bien sencilla. Si a una dinamo le suministramos energía eléctrica, empieza a girar: ¡eso es el motor eléctrico! Lo podemos comprobar fácilmente conectando dos dinamos de bicicletas entre sí mediante dos hilos de cobre. Si la dinamo sólo tiene un polo, el otro hilo de cobre debe unir los chasis metálicos de ambas dinamos. Una de las dinamos la hacemos girar mediante la rueda de la bicicleta, pero la otra debe de estar libre, sin contacto con la rueda. Si lo hacemos comprobaremos como la dinamo libre comienza a girar su eje como si de un motor eléctrico se tratara. La primera dinamo genera la corriente eléctrica (convirtiendo energía mecánica en electricidad), mientras que la segunda consume esa energía convirtiéndola en energía cinética de rotación, al igual que hacen los motores eléctricos.

Muchas más son las experiencias de Física que se pueden realizar con una bicicleta. Así por ejemplo no nos hemos referido a la Termodinámica, a la Óptica, a la Acústica, a la Física de Materiales, etc. Me he limitado sólo a algunas de ellas, dejando muchas otras para otras ocasión. *Esa es otra historia que debe de ser contada en otro lugar.*

## Lo que pasó

- Hace 5000 años (año arriba, año abajo) **una mujer** inventa la **rueda**<sup>1</sup>.
- 1493 **Leonardo da Vinci** diseña una **cadena** de transmisión cuyo boceto se conserva en el Códice de Madrid.
- 1493 **Leonardo da Vinci** (o un monje perverso, o **Marinoni**, o quién sabe quién, entre 1966 y 1969) diseña un boceto de una auténtica **bicicleta**, a la que poco más y sólo le falta el cambio de marchas sincronizado. El dibujo se conserva en el **Codex Atlanticus** de la Biblioteca Ambrosiana de Milán.
- 1791 el **conde de Sivrac** cruza los jardines del palacio de Luis XVI montado en un artificio de dos ruedas sin dirección: **el celerífero**.
- 1817 el **barón von Drais** inventa una máquina con dos ruedas iguales de madera y llantas metálicas, dotada de manubrio. En Francia se le llamó **draisiana**, en Inglaterra y USA **hobby horse**. Para dar la vuelta había que bajarse de la máquina. Algunos habilidosos conseguían levantar la rueda delantera y cambiar de dirección en movimiento. Acababan de nacer los primeros ciclistas.
- 1819 **Dennis Jonson** fabrica en Inglaterra 300 máquinas parecidos al **hobby horse**. (Se disparan las ventas de vendas y esparadrapo)
- 1838 Un herrero escocés, **Kirkpatrick MacMillan**, hizo realidad por primera vez la tracción de la rueda acoplando cigüeñales al eje que se accionaban, a través de bielas, con dos **pedales** situados en el cuadro.
- 1861 **Ernest Michaux** decidió dotar de unos **pedales** a la rueda delantera de una vieja draisiana. La rueda delantera tenía 3 metros de diámetro y el **velocípedo** (pie rápido) tenía una masa de 40 kilogramos.

---

(1) Existen las mismas probabilidades de que fuera una mujer o un hombre. Hasta ahora los libros siempre se han decantado por el hombre violentando, de forma perversa, el rigor de las Matemáticas. ¡Ya es hora de compensar!

- Nace oficialmente el ciclismo de **competición**. Los hermanos **Olivier**, asociados de la fábrica de Michaux, organizaron una carrera en el parque de Saint Cloud de París con 1200 m de recorrido en la que tomaron parte 7 ciclistas, y que ganó el inglés **James Moore**.
- 1879 **H. J. Lawson** inventa la **bicicleta de seguridad**, con las ruedas de igual tamaño, transmisión de **cadena, plato y piñón**.
- 1880 Se añade la **dinamo** a la bicicleta.
- 1888 **J. B. Dunlop** sustituyó las bandas de caucho macizo de las ruedas por el **neumático hinchado** que facilitaba un rodaje más cómodo y rápido. En Francia los hermanos **Michelin** crearon un **neumático desmontable**. En Italia, Giovanni Battista **Pirelli** hizo lo propio. Con el neumático y unas cuantas cámaras de recambio se podía ir a todas partes. Las bicicletas pesaban entre 18 y 20 kilos.
- 1899 Se inventa la **rueda libre**.
- 1903 Se disputa el primer **Tour de Francia**.
- 1920 Aparece el **cambio de marchas**.

## Para saber más

### Libros:

- Whitt, F.R. y Wilson, D.G. *Bicycling Science*, 2ª Ed. Mit Press. Cambridge MS. 1980.
- Watson, R. y Gray, M. *El libro de la bicicleta*, Ed. H. Blume, Madrid, 1980.
- Rauck, M.J.B., Volke, G. y Paturi, F.R. *Historia de la bicicleta*, Ed. H. Blume, Barcelona, 1981.
- Wilcockson, J. *Guía práctica de la bicicleta*, Ed. H. Blume, Madrid, 1982.
- Rowland, F. y Gordon, D. *Bicycling Science*, 2ª Ed. Mit Press. Cambridge MS. 1982.
- Sharp, A. *Bicycles & Tricycles*, 2ª Ed. Mit Press. Cambridge MS. 1982.
- Sánchez Real, J. *La Física de la Bicicleta*, Ediciones de la Torre, Madrid 1988.

### Artículos:

- Jones, A.T. "Physics and Bicycles" *American Journal of Physics* 10 (1942) 332.
- Jones A.T., "The Stability of the Bicycle" *Physics Today* 34 (1970) 23.
- Wilson, S.S. "Bicycle technology" *Scientific American* 228 (1973) 81-91.
- Metz, J. R. "Pedalling Mathematics" *The Mathematics Teacher* 68, 6 (1975) 495-498.
- Dilavore, P. "The bicycle. A module on force, work and energy" 1976 Proyecto *Tech Physics* de la National Science Foundation, USA.
- Liesegang, J. y Lee A.R. "Dynamics of a bicycle: Nongyroscopic effects" *American Journal of Physics* 46 (1978) 130.
- Data, S. "Demonstrations of angular momentum" *American Journal of Physics* 46 (1978) 1190-1192.
- Greenslade, T. B. "Exponential bicycle gearing" *The physics Teacher* 17 (1979) 455-456.
- Kirshner, D. "Some nonexplanations of bicycle stability" *American Journal of*

*Physics* 48 1980 36-38.

- Vieren, J.P. “La bicyclette” *La Recherche* 127 (1981) 1204-1281.
- Lowell, J. “The Stability of Bicycles” *American Journal of Physics* 50 (1982) 1106-1112.
- Thomas, J. “More Bicycle Physics” *The Physics Teacher* 21 (1983) 360-363.
- Gross, A. C., Kyle, Ch. T., y Malewicki, D. J. “Aerodinámica de los vehículos terrestres de propulsión humana” *Investigación y ciencia* 89 (1984) 82-91.
- Wochele, R. “Die Spass-Maschine” *Natur: Das Umweltmagazine* 4 (1988) 71-77.
- Sancho, C. y Yagüe, C. “Algunos recursos didácticos en Física” *Aula Nova* 1 (1989) 10-53.
- Hunt, R.C. “Bicycles in the Physics Lab” *The Physics Teacher* 27 (1989) 160-165.
- Fajans, J. “Steering in bicycles and motorcycles” *American Journal of Physics* 8 (2000) 654-659.

#### **Direcciones de Internet sobre Física y bicicleta:**

- [http://www.princeton.edu/~humcomp/bikes/hist/histo\\_1.htm](http://www.princeton.edu/~humcomp/bikes/hist/histo_1.htm)  
Proyecto Bicicleta e Ingeniería.
- <http://vigyan.nsu.edu/~jan/>  
Proyecto sobre la bicicleta. Contiene enlaces.
- <http://www.phys.ksu.edu/perg/bicycle/>  
Proyecto sobre la bicicleta.
- <http://www.science.uva.nl/research/amstel/bicycle/>  
Proyecto sobre la bicicleta.
- [http://www.polycollege.ac.at/1476/Physikalische\\_Soiree/Sendungen/cycling.htm](http://www.polycollege.ac.at/1476/Physikalische_Soiree/Sendungen/cycling.htm)  
Proyecto sobre la bicicleta.

- <http://oliver.aapt.org/meetings/124th/scheduler/IndexResult.cfm?Code=EA02>  
Encuentro de profesores de Física sobre la bicicleta.
- <http://www.angelfire.com/pq/bicycles/>  
Física de la bicicleta.
- <http://newton.dep.anl.gov/askasci/phy00/phy00043.htm>  
Preguntas sobre la Física de la bicicleta.
- <http://www.phys.ksu.edu/perg/bicycle/resources/>  
Bibliografía sobre la Física de la bicicleta.
- <http://www.physik.uni-augsburg.de/~ferdi/fahrrad/lit.html>  
Bibliografía sobre la Física de la bicicleta.
- [http://www.sci-ctr.edu.sg/ScienceNet/cat\\_physical/cat\\_gen15886.html](http://www.sci-ctr.edu.sg/ScienceNet/cat_physical/cat_gen15886.html)  
Enlaces sobre Física de la bicicleta.
- <http://www-istp.gsfc.nasa.gov/stargaze/Mnewton.htm>  
Leyes de Newton y bicicleta.
- <http://ist-socrates.berkeley.edu/~fajans/Teaching/bicycles.html>  
Estabilidad de la bicicleta.
- <http://physics.about.com/library/weekly/aa050900a.htm>  
Estabilidad de la bicicleta.
- <http://www.physicscentral.com/lou/lou-01-1.html>  
Estabilidad de la bicicleta.
- <http://www.lns.cornell.edu/spr/2000-05/msg0024874.html>  
Estabilidad de la bicicleta.
- <http://www.geocities.com/CollegePark/Campus/1832/pyfair.html>  
Estabilidad de la bicicleta.
- <http://www.science.uva.nl/research/amstel/bicycle/partic/Bart/Project/index.html>  
Las fuerzas en el pedal.

- <http://aci.mta.ca/TheUmbrella/Physics/P3401/Investigations/BikeBL.html>  
Fuerzas y momentos en la bicicleta.
- <http://www.readysoft.es/home/mxicola/novedades.html>  
Suspensión en las bicicletas.
- [http://space.tin.it/sport/steserni/cx/Cx\\_crp.html](http://space.tin.it/sport/steserni/cx/Cx_crp.html)  
Bicicleta y aerodinámica. Cálculos.
- <http://www.xsystems.co.uk/machinehead/powercal.html>  
Programas para calcular rendimientos, calorías, etc. Permite descargar software.
- [http://www.princeton.edu/%7Easmits/Bicycle\\_web/bicycle\\_aero.html#top](http://www.princeton.edu/%7Easmits/Bicycle_web/bicycle_aero.html#top)  
Aerodinámica de la bicicleta.

**Direcciones de Internet sobre Historia de la bicicleta:**

- [http://www.eafit.edu.co/departamentos/disenio/asignaturas/objetosproductos/la\\_bicicleta.htm](http://www.eafit.edu.co/departamentos/disenio/asignaturas/objetosproductos/la_bicicleta.htm)  
Amplia Historia de la bicicleta.
- <http://www.pacocostas.com/evial3.html>  
Breve Historia de la bicicleta.
- <http://www.cicloturismoaventur.com.ar/histobici.html>  
Breve Historia de la bicicleta.
- <http://www.phys.uri.edu/~tony/bicycle/bikehist.html>  
Historia sencilla de la bicicleta. Bibliografía.
- <http://www.traccion.com.ar/index.htm>  
Historia de la bicicleta y otras cosas.

### Otras direcciones sobre la bicicleta:

- <http://www.pedalinghistory.com/>  
Enlaces y más sobre la bicicleta.
- <http://www.physik.uni-augsburg.de/~ferdi/fahrrad/links.html>  
Enlaces a páginas sobre la bicicleta.
- <http://tigger.uic.edu/~jfazio/es.html>  
Enlaces a páginas sobre la bicicleta.
- <http://digilander.iol.it/lbyro/rebel.htm>  
Curiosidades sobre la bicicleta (italiano).
- <http://www.clavis.it/Personal/claudiob/lealtrengb.html>  
Bicicleta de Leonardo desenmascarada.
- <http://www.readysoft.es/home/mxicola/hpvsipain.html>  
Bicicletas recicladas.
- [http://ar.dir.yahoo.com/deportes\\_y\\_recreacion/deportes/ciclismo/Ciclismo de montana/](http://ar.dir.yahoo.com/deportes_y_recreacion/deportes/ciclismo/Ciclismo_de_montana/)  
Enlaces sobre bicicletas de montaña.
- <http://guia.hispavista.com/Deportes/Ciclismo/>  
Página sobre ciclismo con numerosos enlaces.
- [http://www.ociototal.com/recopila2/r\\_dep/ciclismo.html](http://www.ociototal.com/recopila2/r_dep/ciclismo.html)  
Buscador sobre ciclismo muy completo.
- <http://www.sport-market.net/ciclismo.htm>  
Enlaces a páginas de amigos del ciclismo.
- <http://www.webdelcule.com/varios/cicli1.html>  
Todo sobre el ciclismo.
- [http://www.accedenet.com/esp/entretenimientos/deportes/deportes\\_ciclismo.html](http://www.accedenet.com/esp/entretenimientos/deportes/deportes_ciclismo.html)  
Enlaces sobre ciclismo.

- [http://www.lafacu.com/apuntes/educacion/vial\\_circular\\_en\\_bicicleta/default.htm](http://www.lafacu.com/apuntes/educacion/vial_circular_en_bicicleta/default.htm)  
Normas sobre circulación con bicicleta.
- <http://dual400.edv.uniovi.es/miguel/princ.htm>  
Página personal sobre ciclismo.
- <http://habitat.aq.upm.es/boletin/n6/aeber.html>  
Artículo sobre historia y vías ciclistas de España.
- <http://www.amigosdelpedal.com.ar/frames.html>  
Amigos del pedal.
- <http://www.santacruz.g12.br/multimid/bike/sld001.htm>  
Diapositivas en Power Point sobre la bicicleta.
- <http://links.math.rpi.edu/webhtml/appletlibrary.html>  
Simulaciones del pedal.

## The End

Era el mes de agosto y acabábamos de llegar a **Verona**. Un gran cartel anunciaba para esa noche en **la Arena** la puesta en escena de Aïda. En muchos establecimientos se leía el habitual *chiuso per ferie* (cerrado por vacaciones ) típico del *ferragosto* italiano. **Roque** no tuvo otra ocurrencia que comentar: - ¡Mirad: venden churros por feria en todos sitios! La risa nos duró hasta que llegamos al mismo centro de la ciudad.

Pero quizá lo que más nos impresionó de Verona fue el espectáculo de ver que todo el mundo se desplazaba por la ciudad en bicicleta. Jóvenes en sus bicis de montaña, y personas de más de sesenta años en las de paseo, madres con sus hijos convenientemente atados a sus portabebés, amas de casa con la compra cotidiana en la cesta delantera...Fue toda una lección de cómo una ciudad había hecho suya la **cultura de la bicicleta**. ¡Qué bien se respiraba!, y en cuanto a los ruidos, era una gozada escuchar el trino de los pájaros y los ladridos de los perros. Aquello me impresionó, y -por qué no confesarlo- sentí una sana envidia al compararla con nuestras ruidosas y contaminadas ciudades.

Ojalá estas breves líneas sirvieran para fomentar un poco más esa cultura de la bicicleta. Su uso y disfrute incrementa de forma considerable la calidad de vida, y la hace más amable, solidaria y saludable. Es un medio de transporte económico, asequible a cualquier bolsillo tanto en su adquisición como en su mantenimiento y reparación. No contamina ni produce vertidos de residuos (ni sólidos, ni líquidos, ni gaseosos) al entorno. Apenas erosiona el terreno que pisa y no emite ningún tipo de contaminación acústica. Es un medio de locomoción y desplazamiento cotidiano muy eficaz, con el que podemos recorrer un buen número de kilómetros, a una velocidad razonable, para descubrir la belleza del recorrido, con mínimo esfuerzo, y con posibilidades ajustadas de transportar equipaje. Dota a los adolescentes de unas posibilidades de autonomía considerables en tiempo, espacio y economía, sin dependencia de transportes públicos o de los peligrosos ciclomotores. Supone una importante fuente de salud y bienestar, incrementando la forma física del ciclista. Nos ofrece una nueva gama de sensaciones, percepciones y experiencias que de otra forma se nos escaparían. Es una estupenda opción deportiva, con innumerables variantes. Nos permite un contacto directo con la naturaleza. Su uso generalizado resolvería de raíz los problemas de tráfico en las grandes ciudades, y las descongestionaría haciéndolas más habitables. Es un estupendo instrumento de educación vial y cívica que nos hace mejores (si un automovilista pincha no para ni la guardia civil. Si lo hace un ciclista, nos damos de bofetadas por ayudarle. Además siempre nos saludamos con nuestros códigos al cruzarnos).

Si utilizáramos habitualmente la bicicleta para nuestros desplazamientos, llegaríamos a los sitios **antes** (está demostrado que en recorridos intermedios en ciudad la bici es más rápida que el coche), **más** (en bici puedes aparcar donde no lo hace ni el coche del alcalde: en el mismo centro) y **mejor** (economía y ejercicio), viviríamos más a gusto, con ciudades menos contaminadas y menos ruidosas, economizaríamos recursos energéticos, el aire sería más limpio, nos encontraríamos a menudo con un rato para pensar (quien pedalea, pone sus ideas en orden), disfrutaríamos de la caricia del aire fresco en nuestra cara, haríamos de forma agradable un rato de ejercicio físico, moveríamos las piernas y el corazón, disminuirían los accidentes urbanos de motocicletas y coches, ahorraríamos una pasta gansa en gasolina, oíríamos mil sonidos que habitualmente se nos escapan, apreciaríamos que el río huele como cuando éramos niños (ya no lo recordábamos, qué gozada esos olores de antaño, que siguen ahí, pero escondidos)...seríamos más felices, gracias a nuestra humilde y a la par increíble bicicleta... ¡Y hasta podemos aprender Física! Por eso y por cien mil razones más:

