



“LA BICICLETA EN EL LABORATORIO DE FÍSICA: UNA FORMA AMENA Y DIVERTIDA DE APRENDER”

Luis María González Méndez

*Doctor en Física y en Historia.
Profesor del IES “Albarregas”
(Mérida) y profesor asociado de la
UEX (Ingeniería en Diseño
Industrial)*

1-. ¿CÓMO SURGIÓ LA IDEA?

De forma inopinada, como suele suceder con estas cosas. Hacía tiempo que aparcar en la antigua Politécnica 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 hacía 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 inclinar la rueda! Y ya cuando hicimos subir a una alumna a un taburete giratorio que espontáneamente giraba 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 más de 30 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 desfilarse 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 neumáticos 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. También están presentes las magnitudes complementarias como el ángulo (inseparable de la velocidad angular de las ruedas), o el mol (mediante un sencillo cálculo podríamos calcular el número de moles de aire que albergan los neumáticos a una determinada presión). 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.

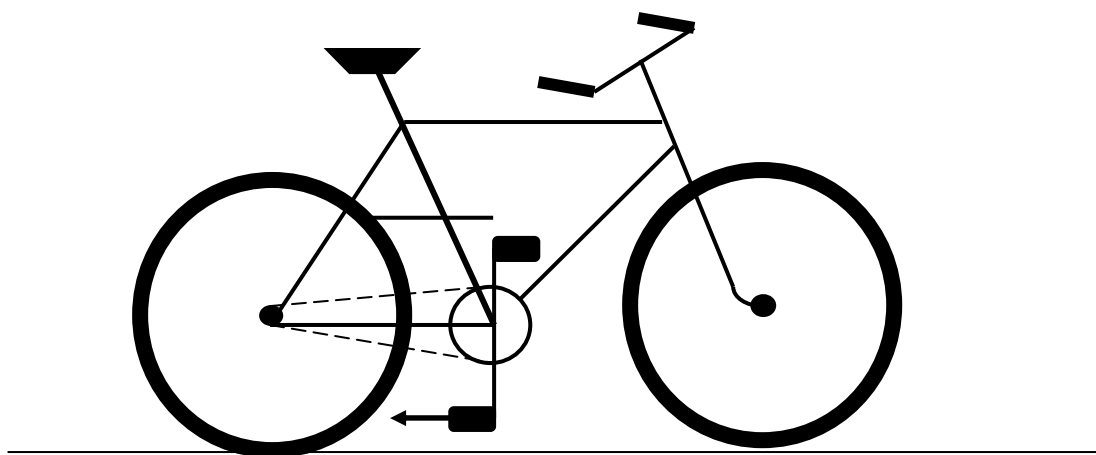
La idea fue tomando cuerpo, pues además pensaba que si era viable, podría suponer un buen recurso pedagógico en escenarios docentes precarios, tales como Centros de Enseñanza no suficientemente dotados, países del Tercer Mundo, etc. donde muchas veces la imaginación debe hacer frente a condiciones ciertamente 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?

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 para alumnos que van a ser futuros ingenieros, 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 scooter por la bici, no habríamos perdido el tiempo.

2-. ¡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?



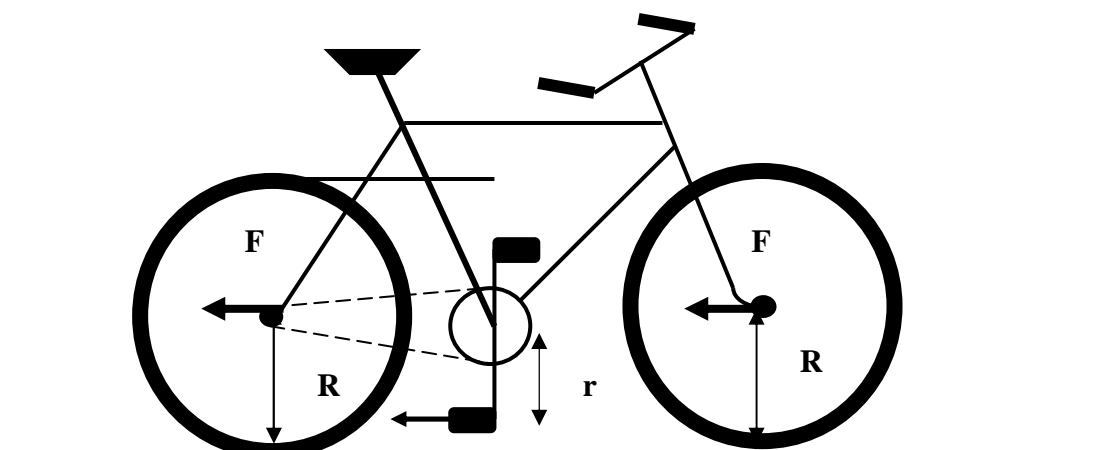
Fuerza F

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.



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

Fuerza F

3-. 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 caer 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 compresibilidad 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 caer 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.

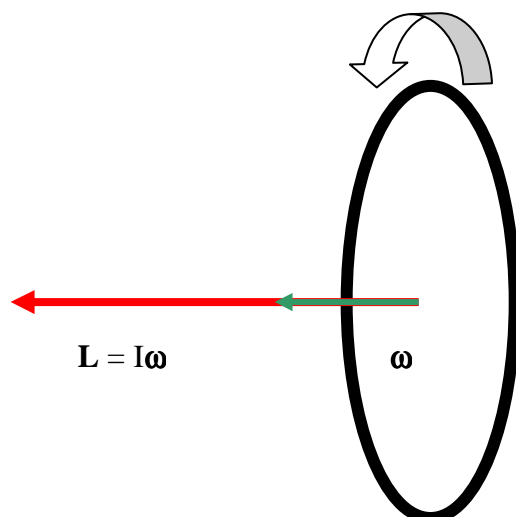
4-. ¿EN QUÉ SE PARECE UNA ESCOBA A UNA BICICLETA?

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, siempre acabamos avanzado un poco si no queremos caer. 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 de giro. 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 rapidez, el manillar se opone 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.

5-. 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 bicicleta 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.

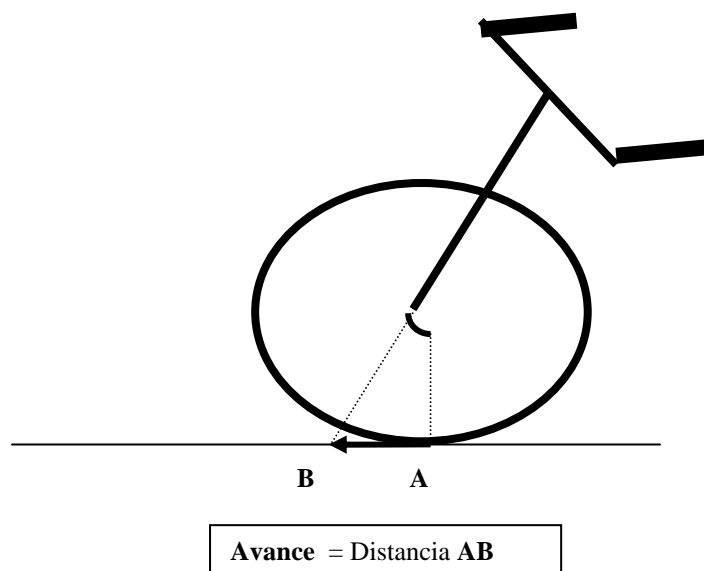
6-. UNA BICICLETA CON PILOTO AUTOMÁTICO

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. 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 culos¹ agradecidos**”.



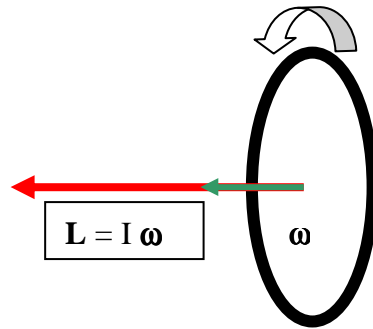
Al igual que la escoba, la bicicleta es estable en movimiento, pero a diferencia de ésta no tienes que estar corrigiendo continuamente la dirección para poner el palo bajo el centro de gravedad. La bicicleta lo hace ella sola por nosotros y automáticamente, así si empieza a tumbarse hacia la derecha, 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**.

7-. 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 **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 ω . Su dirección es

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

perpendicular al plano de la rueda y el sentido nos lo da el avance de un tornillo que gire como lo hace la rueda:



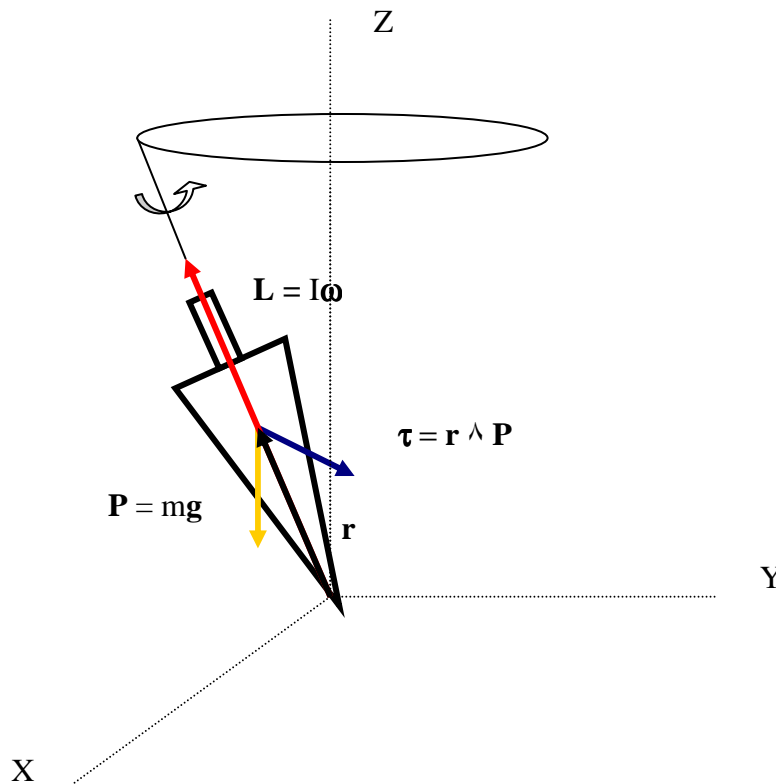
Si sobre un cuerpo que gira se aplica una fuerza externa que no pase por su eje de giro, aparece un momento τ (producto vectorial del vector distancia desde el punto de apoyo, por la fuerza). La ecuación fundamental de la dinámica de la rotación establece que:

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

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

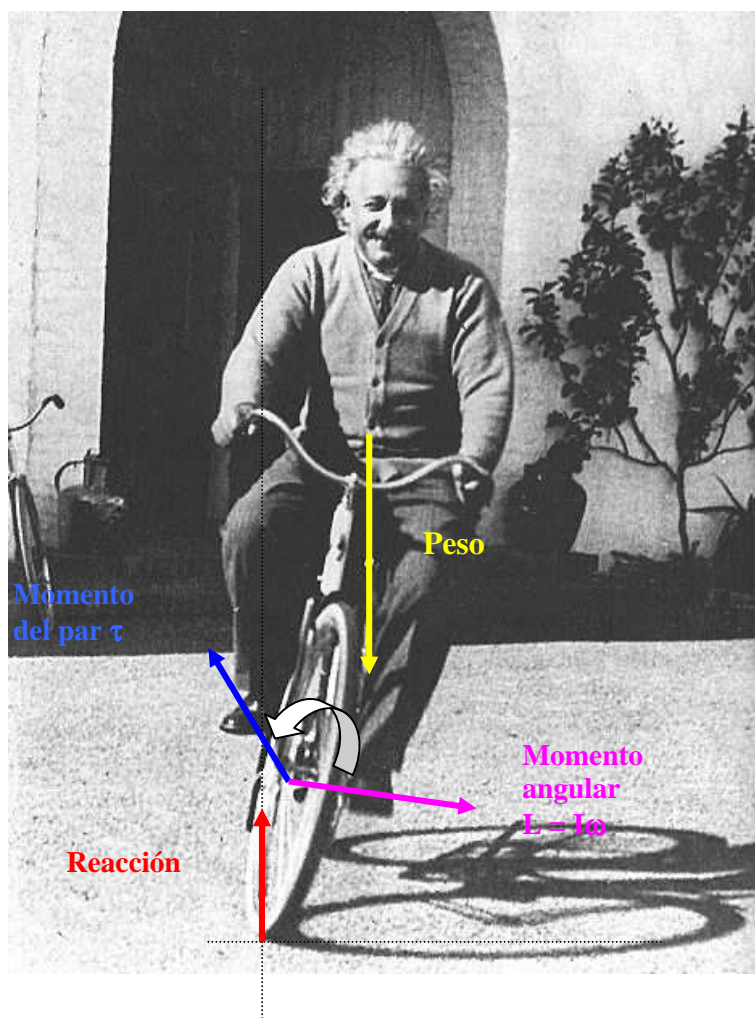
$$d\mathbf{L} = \tau \times dt$$

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 τ , 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 τ 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 τ 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 τ dirigido hacia atrás de la bici. Como consecuencia el momento angular L de la rueda delantera tiene que ir en busca de τ y para ello 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?**



8-. ¿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?...¿pero si casi no puede mantenerse 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, 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.

9-. UN TIOVIVO 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 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 vertical. 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° 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. De alguna manera 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 banqueta 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 tumbiar la rueda. Para ello es necesario que el momento angular de la rueda en su giro horizontal fluya hacia la banqueta cambiando 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 ω , ha de verificarse:

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

De donde:

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

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.

10- ¿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.

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. 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 rozamiento aerodinámico depende del cubo de la velocidad. 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 una resistencia de brasero). Un coche familiar desarrolla potencias del orden de los 100.000 vatios. Por tanto ojo con las cuestas y con el viento: si ibas 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.

BIBLIOGRAFÍA.

- Data, S. "Demonstrations of angular momentum" *American Journal of Physics* 46 (1978) 1190-1192
- Dilavore, P. "The bicycle. A module on force, work and energy" 1976 Proyecto *Tech Physics* de la National Science Foundation, USA
- Fajans, J. "Steering in bicycles and motorcycles" *American Journal of Physics* 8 (2000) 654-659
- 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
- González Méndez, Luis María, *Física y Bicicleta*, Premio Joaquín Sama 2002 a la innovación educativa. Junta de Extremadura 2003
- Greenslade, T. B. "Exponential bicycle gearing" *The physics Teacher* 17 (1979) 455-456
- Hunt, R.C. "Bicycles in the Physics Lab" *The Physics Teacher* 27 (1989) 160-165
- 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
- Kirshner, D. "Some nonexplanations of bicycle stability" *American Journal of Physics* 48 1980 36-38
- Lowell, J. "The Stability of Bicycles" *American Journal of Physics* 50 (1982) 1106-1112
- Liesegang, J. y Lee A.R. "Dynamics of a bicycle: Nongyroscopic effects" *American Journal of Physics* 46 (1978) 130
- Metz, J. R. "Pedalling Mathematics" *The Mathematics Teacher* 68, 6 (1975) 495-498
- Rauck, M.J.B., Volke, G. y Paturi, F.R. *Historia de la bicicleta*, Ed. H. Blume, Barcelona, 1981.
- Rowland, F. y Gordon, D. *Bicycling Science*, 2ª Ed. Mit Press. Cambridge MS. 1982.
- Sánchez Real, J. *La Física de la Bicicleta*, Ediciones de la Torre, Madrid 1988.
- Sancho, C. y Yagüe, C. "Algunos recursos didácticos en Física" *Aula Nova* 1 (1989) 10-53
- Sharp, A. *Bicycles & Tricycles*, 2ª Ed. Mit Press. Cambridge MS. 1982.
- Thomas, J. "More Bicycle Physics" *The Physics Teacher* 21 (1983) 360-363
- Vieren, J.P. "La bicyclette" *La Recherche* 127 (1981) 1204-1281
- Watson, R. y Gray, M. *El libro de la bicicleta*, Ed. H. Blume, Madrid, 1980.
- Whitt, F.R. y Wilson, D.G. *Bicycling Science*, 2ª Ed. Mit Press. Cambridge MS. 1980.
- Wilcockson, J. *Guía práctica de la bicicleta*, Ed. H. Blume, Madrid, 1982.
- Wilson, S.S. "Bicycle technology" *Scientific American* 228 (1973) 81-91
- Wochele, R. "Die Spass-Maschine" *Natur: Das Umweltmagazine* 4 (1988) 71-77