

Llantas ponchadas

W. Luis Mochán
Instituto de Ciencias Físicas, UNAM
Miembro de la Academia de Ciencias de Morelos
mochan@fis.unam.mx

Introducción

Fue una buena aventura. En la noche del 15 de diciembre de 2016 mi hijo recibió una llamada. Sí habría lugar para nuestro equipaje en una camioneta de apoyo. Juntamos un poco de equipo, tienda de campaña, bolsas de dormir, botellas de agua, herramientas, casco, guantes y llevamos nuestras bicicletas la madrugada del 16 al centro de Cuernavaca para reunirnos con los demás y partir pedaleando hacia Playa Ventura [referencia 1]. Recorrimos alrededor de 400 kilómetros pedaleando durante cuatro días para llegar a la playa a descansar y recuperarnos. Esta expedición es organizada anualmente por el *Movimiento Ciclista de Cuernavaca* y en esta ocasión participaron miembros de otros clubes ciclistas como los *Correcaminos* de Cuautla y los *Ciclones* de Guerrero, así como algunos amantes del ciclismo y de la aventura no afiliados a club alguno. La duración del recorrido fue de cuatro días y tres noches, descansando en Paso Morelos, Chilpancingo y Teacoanapa. Dormimos en una plaza cívica, en un gimnasio y en un jardín para llegar a descansar finalmente en la muy ansiada cama de arena debajo de una enramada frente al mar [ref. 1].

por el acotamiento y en una sola fila. La superficie del acotamiento no es del todo adecuada, atravesada ocasionalmente por zanjas, salpicada de piedras y basura, y ocasionalmente de fragmentos de llantas reventadas. Algunas llantas llevan en su interior *cuerdas* de acero, finísimos alambres que tienen la malísima costumbre de romperse; los fragmentos casi invisibles acechan sigilosamente a sus víctimas para en un descuido encajar sus afiladas puntas en los despreocupados neumáticos de sus bicicletas, haciendo pequeña perforaciones en su superficie de rodamiento y en sus cámaras de hule, por donde lentamente escapa el aire. No es posible recorrer 400 kilómetros en una bicicleta con las llantas ponchadas. Previsoramente, llevábamos parches, pegamento, bombas de aire y cámaras de repuesto. Nos vimos forzados a detener repetidamente la marcha para reparar las ponchaduras e inflar los neumáticos antes de poder seguir adelante con nuestra aventura [ref. 1].

Rodando horas a la vez en una larga fila india al lado de la autopista, con el ruido ocasional de los autos, autobuses y camiones, es imposible charlar. El paisaje invita a la contemplación y a relajar la mente mientras las piernas hacen su trabajo, pero después de un tiempo uno empieza a divagar, a hacer preguntas poco comunes y en ocasiones a constatarlas. Una de ellas es el tema de este artículo.

el frente (punto B en la figura) y se dobla de nuevo al despegarse en la parte posterior (punto A). Ese continuo doblar y desdoblarse requiere fuerza y trabajo, y roba energía al ciclista, convirtiéndola en calor. Fijándonos con cuidado en la figura, veremos que la llanta inflada también es plana en su extremo inferior, pero la región plana es mucho más pequeña y el ángulo correspondiente mucho menor que para la ponchada. Claramente, es más fácil rodar una bicicleta con llantas bien infladas que con llantas desinfladas. Obvio, dirá Ud., inflamamos las llantas para no cansarnos tanto al pedalear.

¿Qué tan grande es el trabajo desperdiciado en doblar y desdoblarse el hule de la llanta? No es necesario *calcularlo* para entender que será mayor mientras más grande sea el ángulo θ y la longitud de la región de contacto AB entre la llanta y el suelo (vea la fig. 1).

Esta última puede estimarse fácilmente recurriendo al concepto de *presión* [ref. 2]. La presión P medida en el neumático es la fuerza que ejerce el aire en su interior por unidad de área. En la región de contacto esta fuerza se transmite a través del hule hacia el piso. La presión multiplicada por el área de contacto es la fuerza con la cual el aire empuja al piso a través del neumático. La tercera ley de Newton [ref. 3] nos dice que a toda acción corresponde una reacción igual y opuesta. Por lo tanto, la fuerza que el aire ejerce sobre el hule en contacto con el piso es igual a la fuerza que el piso ejerce sobre la

Por ejemplo, mi masa sumada a la de mi bicicleta anda alrededor de los 100kg. Multiplicados por la aceleración de la gravedad [ref 4.], esto da un peso cercano a los 1000 *newtons* (un newton (1N) es la unidad de fuerza en el sistema estandarizado internacional [ref. 5]). Suelo inflar los neumáticos de mi bicicleta a una presión que supera a la presión atmosférica en 50 *libras por pulgada cuadrada*, equivalente a una fuerza de 34.5 newtons sobre cada centímetro cuadrado [ref. 2]. Para calcular el área de la llanta en contacto con el piso, notamos que como presión es fuerza dividida entre área, podemos despejar el área como la fuerza dividida entre la presión. Por tanto, el área de contacto entre las llantas de mi bicicleta y el suelo es de alrededor de (1000 N)/(34.5 N/cm²) = 29cm², repartidos entre las dos llantas, lo que correspondería a aproximadamente 15cm² en cada una. Como el ancho de las llantas es de unos 3 cm, esta área corresponde a una longitud AB (fig. 1) de ~5cm cuando están bien infladas. Si la presión bajara a la quinta parte de la presión nominal, a sólo 10 libras por pulgada cuadrada, la distancia AB aumentaría cinco veces, a unos 25cm, una distancia totalmente inaceptable para rodar (figura 2).

¿Cómo se transmite la fuerza?

Como hemos visto, cuando me subo a mi bicicleta mi peso se transmite al asiento, de ahí al cuadro a través del poste, de ahí hacia las ruedas a través de los ejes y las masas, a las llantas a través de los rayos y el *rin* (aro) y finalmente

los neumáticos? Antes de seguir leyendo, deténgase, piense unos momentos y trate de responder la pregunta. Quizás desee discutirla con sus amigos o con su viejo profesor de física.

Parecería que la fuerza se transfiere del hule de las llantas al aire encerrado en el interior de los neumáticos, el cual, estando a una presión elevada, empuja al *rin* hacia arriba. Éste a través de los *rayos* carga a la *masa*, cuyo eje carga al *cuadro* o a la *tijera*, estructuras sólidas que llevan la fuerza hasta el asiento que carga al ciclista.

Como le conté al principio de este artículo, en una expedición ciclista se dispone de mucho tiempo para pensar, aún en problemas que parecen triviales. Tras darle muchas vueltas, de repente caí en la cuenta de que hay un error. Es *imposible* que la explicación anterior sea correcta. ¡No hay manera de que el aire atrapado transfiera una fuerza hacia el *rin*! Espero poder convencerlo de esto y de que la respuesta correcta es sutil e interesante.

El lado izquierdo de la figura 3 muestra un corte transversal de una rueda de bicicleta. La fuerza que la llanta ejerce sobre el piso es igual a la presión del aire (P) dentro del neumático multiplicada por el área de la parte plana del neumático, la cual se halla en contacto con el piso. Esta fuerza es igual a aquella con que el piso carga a la llanta. Es de esperarse que la fuerza se transfiera a través del aire hasta la parte inferior del *rin* donde ejercería una fuerza igual y opuesta hacia arriba. Ésta sería la fuerza con que el aire cargaría al *rin*. Sin embargo, el principio de Pascal [ref. 6] nos dice que la presión en un fluido como el aire se transmite hacia todos sus puntos, por lo que en la parte superior del neumático la presión ¡sería la misma que en la parte inferior!, como ilustra misma figura 3. La presión actúa sobre una superficie empujándola en la dirección normal (perpendicular) a la misma, por lo que la parte superior del *rin* es empujada hacia abajo por el aire de arriba ¡con la misma fuerza con la que la parte inferior del *rin* es empujada hacia arriba por el aire de abajo! El resultado es que la fuerza neta que ejerce el aire sobre el *rin* ¡es nula!. Entonces, no es el aire el que carga el peso del vehículo.

Llantas y burbujas de jabón

Querido lector, no se desespere. Este asunto de las llantas ponchadas fue algo que me tomó muchos días meditar. Léalo de nuevo, más despacio, piénselo, descánsese (como yo durante la rodada)... ¿listo? prosigamos. Si no es el aire, ¿qué carga al vehículo? Parece no haber más opción que el hule de la llanta, las paredes

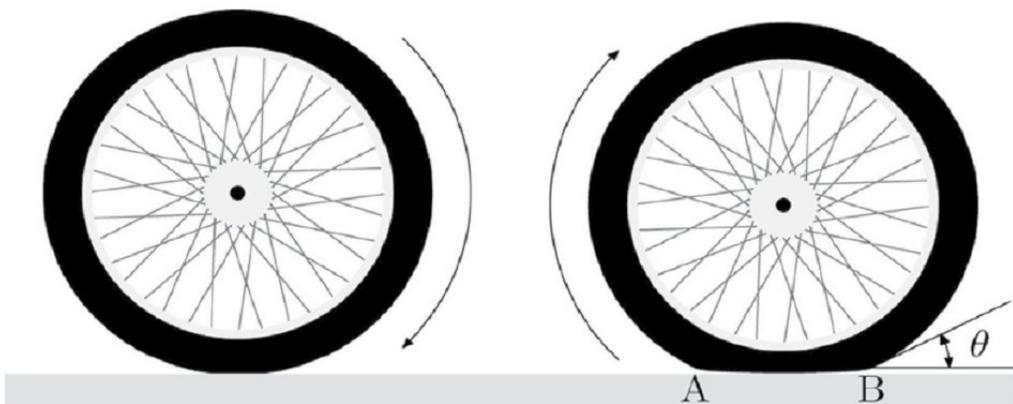


Figura 1. Llanta inflada y llanta ponchada, a medio inflar. Se muestra la dirección de rotación, la parte frontal B y posterior A de la región plana en contacto con el piso, y el ángulo θ de contacto.

El único inconveniente de la expedición fue que los primeros días rodamos sobre la Autopista del Sol, una vía de alta velocidad. Como además eran los primeros días de vacaciones, el tráfico vehicular era intenso. Una pequeña dosis de prudencia nos convenció de que deberíamos circular

¿Para qué inflamamos los neumáticos?

En la figura 1 podemos ver dos llantas, una bien inflada y otra no. Notamos que la parte inferior de la llanta desinflada es plana, por lo que al rodar, el hule se dobla abruptamente un ángulo θ al entrar en contacto con el piso por

llanta. Pero ésta última es la misma que la que la llanta comunica al cuadro de la bicicleta y al ciclista que lleva arriba. Si la bicicleta no sale volando por los aires es porque la fuerza que el piso ejerce sobre las llantas es exactamente igual al peso de la bicicleta más el del ciclista.

al piso que carga a la bicicleta. La reacción a esta cadena de fuerzas se transmite del piso a las llantas, al *rin*, a los rayos, a las masas, al cuadro, al poste y al asiento que sostiene mi peso. ¿Cómo se propaga esta fuerza desde el piso hasta el ciclista? ¿Qué papel juega el aire a presión encerrado en

ACADEMIA DE CIENCIAS DE MORELOS, A.C.

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

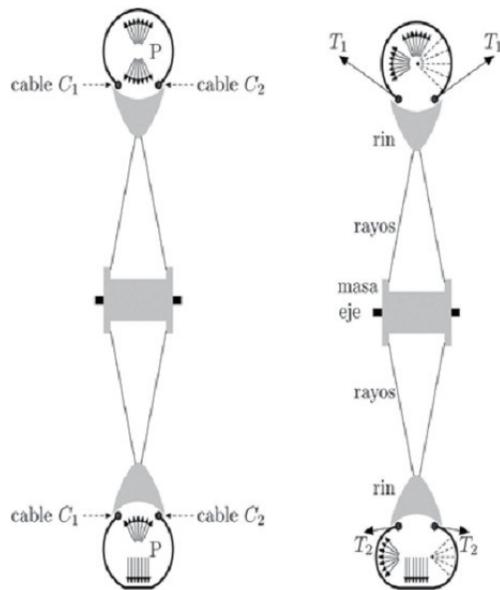


Figura 3. Corte transversal de una rueda de bicicleta. Se muestran el eje, la masa unida mediante rayos al rin y el hule de la llanta. No se muestra la delgada cámara. Del lado izquierdo las flechas corresponden a la fuerza producida por la presión sobre el fondo de la llanta, sobre la parte inferior del rin y sobre la parte superior del rin. Se muestra un corte de los aros formados por los cables C1 y C2 embebidos en los bordes interiores de la llanta. Del lado derecho se incorpora una deformación más realista (aunque algo exagerada) de su parte inferior. Las flechas ilustran la fuerza que ejerce la presión del aire sobre las partes superior, inferior del piso y la pared de la llanta, y el tamaño y dirección de las tensiones T1 y T2 con que las paredes jala a los aros embebidos en los bordes. Las líneas punteadas son algunos radios para mostrar las diferencias entre los radios de curvatura y las curvaturas en la parte superior e inferior de la llanta. Se señalan el eje, la masa, los rayos y el rin de una de las ruedas.

del neumático. Pero no, el hule por sí mismo es flexible y se dobla fácilmente al colocar sobre él un peso, como ilustra la figura 2. El delgado hule de una llanta es incapaz de cargar.

De hecho, el hule de una llanta no se halla en un estado de *compresión*, sino en un estado de *tensión*, estirado, luchando contra la presión del aire en su interior. Si no se separa del rin dejando salir el aire es porque en sus bordes internos tiene embebidos unos aros circulares, formados frecuentemente por cables de acero que evitan que los bordes se estiren. En la figura 3 se muestra el corte transversal de estos dos cables C₁ y C₂.

¿Qué tan grande es la tensión en el hule? Para responder esta pregunta, vaya a algún parque, busque a algún niño jugando con burbujas de jabón y pídale prestado momentáneamente el aro circular mojado en agua jabonosa con que las produce. Observe cuidadosamente la película delgada de agua y jabón. Notará que forma, en ausencia de viento, un disco plano cuyo borde es el aro. Ahora sople muy ligeramente y observe cómo la película se deforma, convirtiéndose

en un casquete esférico, casi plano, con una *curvatura* pequeña. Mágicamente la *forma* de la película se ajusta hasta que la tensión superficial [ref. 7] produce una fuerza que cancela exactamente a la fuerza debida a la presión que ejercemos con nuestro aliento (figura 4). Sople un poco más fuerte y observe cómo la película aumenta su curvatura. Esta experiencia nos muestra que mientras mayor es la curvatura de una superficie, mayor es la presión que puede equilibrar. Análogamente, mientras mayor sea la curvatura, menor será la tensión en la superficie necesaria para equilibrar una presión dada. Note también cómo cambia la dirección en la que la tensión actúa sobre el aro conforme cambia la curvatura.

¿Empujar o jalar?

El lado derecho de la figura 3 es una versión un poco más realista del corte transversal de una llanta que el lado izquierdo. En la parte superior mostramos la fuerza que produce la presión del aire sobre la parte superior de la llanta. Dicha fuerza se ve equilibrada por la tensión en el hule. Esa tensión *jala* a los cables del borde in-

terior a lo largo de la tangente a la llanta, una línea recta paralela a la superficie del hule en su borde, ilustrada por los las flechas T₁. Las componentes verticales de dicha fuerza *jalan* al cable que recorre el borde interno de la llanta hacia arriba. En la parte baja de la llanta sucede algo similar. Sin embargo, el piso empuja a la llanta hacia arriba, aplanándola ligeramente. Debido a esto, la curvatura en las paredes inferiores de la llanta es mayor que en las paredes superiores. Por ello, a pesar de que la presión del aire en la parte inferior es igual que en la parte superior, la fuerza correspondiente es compensada por una tensión *menor*. La tensión T₂ que jala hacia abajo a la parte inferior de los cables es menor que la tensión T₁ que los jala hacia arriba. Además, la dirección en la que apunta es más cercana a la dirección horizontal que en la parte superior (fig. 3). Por lo tanto, el hule en la parte superior de la llanta jala hacia arriba más que lo que el hule en la parte inferior jala hacia abajo. La diferencia entre estas fuerzas es la fuerza neta que el cable transfiere hacia el rin, y que el rin transfiere al cuadro y al ciclista, alcanzando un perfecto balance dinámico.

Conclusiones

Contra lo que parecería evidente, el aire de los neumáticos *no* es lo que empuja a la bicicleta hacia arriba para vencer la fuerza de gravedad. La fuerza neta producida por el aire sobre la llanta y sobre el rin es nula, pues la presión es *homogénea e isotrópica* (igual en todas partes y en todas las direcciones). Al rin no lo sostiene el aire y no lo carga el hule de las paredes de la llanta. Más bien, el rin cuelga de un aro de acero que es jalado hacia arriba y hacia abajo por la tensión del hule en la parte superior e inferior de la llanta, respectivamente. Es la diferencia entre el tamaño y la dirección de la fuerza asociada a esta tensión entre la parte superior y la inferior de la llanta, asociada al cambio en la forma de su sección transversal, la que produce una fuerza neta hacia arriba, la cual es igual y opuesta a la parte proporcional del peso del vehículo que carga la rueda. Curiosamente, en una bicicleta las masas también son objetos colgantes. Cuelgan del rin a través de los delgados y flexibles rayos, que serían incapaces de soportar una compresión sin doblarse. En cierto sentido, tensar los rayos de los que cuelgan las masas es equivalente a inflar los neumáticos de cuyas paredes cuelgan los aros y los rines. Las bicicletas cuelgan de los rayos y de las delgadas paredes de hule de los neumáticos. Entonces, ¿para qué inflamos los neumáticos? No es para empujar al vehí-

culo hacia arriba soportando su peso; inflamos las llantas únicamente para poner en un estado de tensión a sus paredes, lo cual les permite *jalar* al vehículo hacia arriba equilibrando a la fuerza de gravedad.

Preguntas tan simples como el propósito de inflar las llantas nos puede llevar a aprender sobre muchos efectos sutiles, como son las relaciones entre la presión, la tensión, la geometría, la fricción y la transmisión de las fuerzas que afectan cómo ruedan los vehículos sobre los caminos. Podemos aprender mucha ciencia de observar y pensar en los fenómenos más modestos.

Agradecimiento

Este trabajo fue apoyado por DGAPA-UNAM mediante el proyecto IN13016. Agradezco al Movimiento Ciclista de Cuen-

avaca la invitación a participar en la rodada a Playa Ventura, así como a todos los participantes y al equipo de apoyo por su compañía, camaradería, solidaridad y logística.

Referencias

Rodada Cuernavaca-Playa Ventura, <http://bit.ly/2mzy1vv>.
 Presión - Wikipedia, la enciclopedia libre <http://bit.ly/2mxPGnC>.
 Leyes de Newton - Wikipedia, la enciclopedia libre <http://bit.ly/2yNSA9b>.
 Física: Aceleración de la gravedad <http://bit.ly/2z9kxgd>.
 Fuerza - Wikipedia, la enciclopedia libre <http://bit.ly/2A8xre8>.
 Principio de Pascal - Wikipedia, la enciclopedia libre <http://bit.ly/2zlwBT>.
 Tensión superficial - Wikipedia, la enciclopedia libre <http://bit.ly/2yPMaX4>.

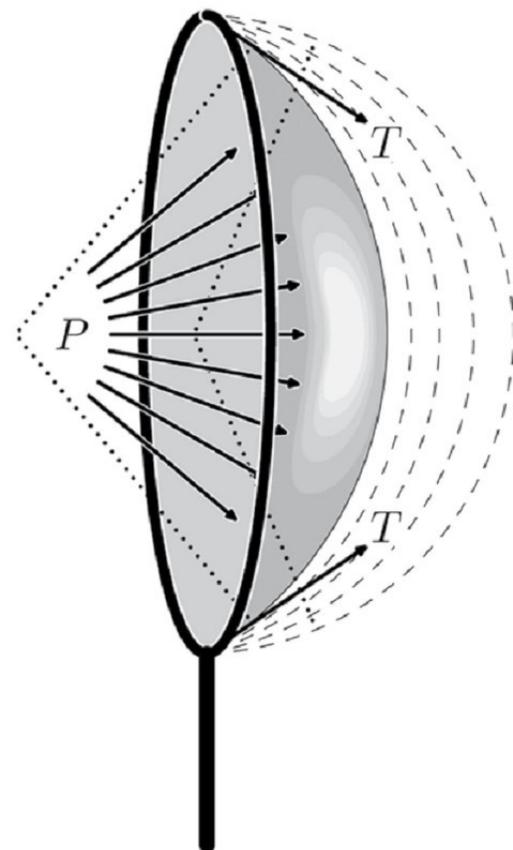


Figura 4. Aro circular mojado en agua jabonosa. La película de jabón forma un casquete esférico cuya frontera es el aro. La fuerza que el exceso de presión P ejerce sobre la película (flechas del lado izquierdo) se transmite al aro a través de la tensión T de la superficie (flechas del lado derecho). Las líneas punteadas corresponden de izquierda a izquierda con la forma que adquiere la película conforme aumenta la presión P. Se muestran dos perpendiculares a la superficie más plana y otras dos perpendiculares a la superficie más curva con líneas punteadas. Cada pareja de líneas punteadas se cruzan en el centro de curvatura, su longitud es el radio de curvatura y su inverso se define como la curvatura de la superficie correspondiente.