MECANICA *para todos*

Yakov Perelman

Preparado por Patricio Barros
Antonio Bravo

PREÁMBULO

El presente libro, que casi no rebasa el marco de la física elemental, está destinado a aquellos lectores que han estudiado la física en la escuela secundaria y, por lo tanto, consideran que dominan bien sus principios.

Al escribir este libro no me propuse proporcionar al lector nuevos conocimientos, sino más bien ayudarle a «conocer aquello que ya sabe», es decir, a profundizar y animar los conocimientos de Física que ya posee y a estimularle a que los aplique de manera consciente y multifacética.

Este propósito se logra examinando toda una serie abigarrada de rompecabezas, preguntas complicadas, cuentos, problemas divertidos, paradojas y comparaciones inesperadas del campo de la Física, relacionadas con fenómenos que observamos cotidianamente o que se toman de los libros de ciencia ficción más populares.

Este último tipo de materiales es el que más ha utilizado el autor, por considerar que es el que mejor se presta a los fines de la obra. Entre ellos se mencionan trozos de novelas y cuentos de Julio Verne, H. G. Wells, Mark Twain, etc. Los fantásticos experimentos que en estas obras se describen, además de ser interesantes, pueden servir de magníficas y animadas ilustraciones para la enseñanza.

El autor ha procurado, en la medida de lo posible, darle a la exposición una forma interesante y hacer amena esta asignatura. Para ello ha partido del axioma psicológico que presupone, que el interés por una asignatura aumenta la atención, facilita la comprensión y, por consiguiente, hace que su asimilación sea más sólida y consciente.

Yakov Perelman

CAPÍTULO 1
LAS LEYES FUNDAMENTALES DE LA MECÁNICA

Contenido

1. El experimento de los dos huevos

En una mano tenemos un huevo, al que golpeamos con otro huevo. Ambos huevos son igualmente fuertes y se encuentran en las mismas condiciones. ¿Cuál de los dos se rompe: el golpeado o el que asesta el golpe?

Esta pregunta fue planteada, hace algunos años, por la revista norteamericana "Ciencia e Invención". La revista responde que, según la experiencia, resulta más frecuentemente roto el huevo que se *movió*; con otras palabras, el huevo que asestó el golpe.

"La cáscara del huevo, explicaba la revista, tiene una forma oblicua, por esto la presión, efectuada por el golpe, sobre el huevo que no se ha movido, llega hacia la cáscara desde fuera; y como es sabido, la cáscara del huevo, semejante a cualquier bóveda, resiste bien a la presión desde fuera; existe también el hecho que el esfuerzo fue realizado con el huevo que se movió. En este caso el huevo que se encuentra en movimiento empuja, en el momento del golpe, *desde el interior*. La bóveda resiste menos frente a tal presión que a la que viene del exterior y por eso se rompe".

Cuando se expuso este problema y se difundió en las revistas de Leningrado, las respuestas fueron extremadamente variadas.

Algunas de las soluciones afirmaban que la rotura se debía efectuar inevitablemente en el huevo que asestó el golpe y otras decían que este huevo tenía que ser el que queda quieto.

Las pruebas parecían unánimemente verosímiles y no podían en nada cambiar ambas afirmaciones ¡que son fundamentalmente falsas!

Es imposible fijar una norma, de la cual se pueda deducir cuál de los dos huevos se rompe, porque no existe ninguna diferencia entre el huevo golpeado y el que asesta el golpe. No es posible alegar que el huevo que asesta el golpe se mueve y el golpeado se queda quieto. Quieto, ¿en relación a qué? Si es en relación al globo terrestre, entonces es bien sabido, que incluso nuestro propio planeta se desplaza entre las estrellas, efectuando decenas de diversos movimientos; todos estos movimientos afectan tanto al huevo "golpeado", como al que "asesta el golpe", y nadie puede decir cuál de los dos se mueve con mayor rapidez entre las estrellas. Para pronosticar el destino del huevo por medio del testimonio del movimiento y del reposo, es necesario retomar toda la astronomía y definir el movimiento de cada uno de los huevos que se golpea en relación con los astros que no se mueven.

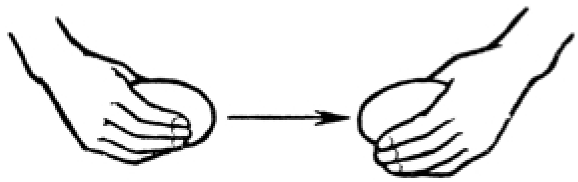


Figura 1. ¿Cuál de los dos huevos se romperá?

Esto no es posible hacerlo porque varios de los astros, en reposo aparente, también se mueven, al igual que todo su conjunto; la Vía Láctea, se mueve en relación a la aglomeración de sus estrellas.

El experimento de los huevos, como puede verse, nos arrastra hacia el momento mismo de la creación del mundo y nos indica que no estamos cerca de la solución de este problema. Por otra parte, tampoco estamos tan alejados, porque la excursión hacia los astros puede facilitarnos la comprensión de aquella verdad que afirma que es imposible imaginarse el movimiento de los cuerpos sin el impulso de otros cuerpos, con los cuales se relaciona dicho movimiento.

Los cuerpos que están relacionados entre sí no se pueden mover de forma aislada, sólo se pueden transformar dos cuerpos que estén relacionados, aproximándose o alejándose recíprocamente. Los huevos que chocan se encuentran en el mismo estado de movimiento; se aproximan recíprocamente, esto es todo lo que podemos decir sobre sus movimientos. El resultado de su encuentro no depende de cuál de los dos consideremos como inmóvil y cuál consideremos en movimiento.

Hace trescientos años, Galileo fue el primero en proclamar la relación proporcional entre el movimiento y el reposo y su equivalencia. No se debe confundir este "principio de la relatividad de la mecánica clásica" con el "principio de la relatividad de Einstein", que ha abierto los ojos de la actual generación y que representa un desarrollo ulterior del primer principio.

Sobre la teoría de Einstein se hablará en los últimos capítulos de nuestro libro; pero para su comprensión es imprescindible aclarar bien la importancia esencial del principio de Galileo.

2. El viaje en el caballo de madera

De lo hasta ahora dicho, se deduce, que el estado de movimiento en línea recta no se distingue proporcionalmente del estado de reposo en las condiciones de un movimiento uniforme y rectilíneo del medio que rodea al cuerpo en reposo. Decir "el cuerpo se mueve con una rapidez constante" y "el cuerpo se encuentra en estado de reposo, pero todo lo que le rodea se mueve proporcionalmente hacia el lado opuesto", significa afirmar la misma cosa. Estrictamente dicho, no debíamos emplear ni una ni otra expresión, sino que debíamos decir, que el cuerpo y el medio que le rodea se mueven uno en relación al otro. Esta idea, aun en nuestros días, está lejos de ser asimilada por las personas que tienen que ver con la mecánica. Pero ella no fue extraña al autor de "El Ingenioso Hidalgo Don Quijote de la Mancha"[1] que vivió hace cuatrocientos cincuenta años y que no había leído a Galileo. Esta idea forma una de las escenas más divertidas de la obra de Cervantes, en la cual se describe el viaje accidentado del caballero y de su escudero en un caballo de madera.

Para montar sobre este caballo, "no hay más que torcer esta clavija que sobre el cuello trae puesta, que él los llevará por los aires a donde atiende Malambruno; pero porque la alteza y sublimidad del camino no les cause vaguidos, se han de cubrir los ojos hasta que el caballo relinche, que será señal de haber dado fin a su viaje"

"... y así, sin más altercar, subió sobre Clavileño[2] y le tentó la clavija".

Los que le rodeaban, afirmaron al hidalgo que él estaba cabalgando con la rapidez de una flecha.

"... y en verdad, que no sé de qué te turbas, ni te espantas, que osaré jurar que en todos los días de mi vida no he subido en cabalgadura de paso más llano: no parece sino que no nos movemos de un lugar. Destierra amigo, el miedo, que en efecto la cosa va como ha de ir, y el viento llevamos en popa".

---

[1] Miguel de Cervantes Saavedra, novelista, poeta y dramaturgo español. Nació el 29 de septiembre de 1.547 en Alcalá de Henares y murió el 22 de abril de 1.616 en Madrid.

[2] *Clavileño.* Nombre del caballo de madera con el que unos duques gastan una broma a Don Quijote y Sancho Panza, en la segunda parte de la novela de Miguel de Cervantes.

Clavileño el Alígero, como su nombre y apodo indican, es una estructura de madera en forma de caballo con una clavija en la cabeza con la que se controlan sus movimientos, que les es presentada a los burlados como un ser capaz de volar con ligereza hasta los cielos. *(N. del E.)*

-"Así es la verdad -respondió Sancho- que por este lado me da un viento tan recio, que parece que con mil fuelles me están soplando. Y así era ello, que unos grandes fuelles le estaban haciendo aire".

El caballo de madera de Cervantes, sigue funcionando en numerosas atracciones, que fueron inventadas para distraer al público en las ferias y parques.[3] Tanto uno como otros están basados en la imposibilidad de diferenciar el estado de reposo, de un movimiento uniformemente acelerado.

3. El sentido común y la mecánica

Muchos acostumbran oponer el reposo al movimiento, como el cielo a la tierra y el fuego al agua. Sin embargo, esto no les impide descansar durante la noche en un vagón con litera y no ocuparse de si el tren está parado o en marcha. Pero en la teoría, a menudo tales hombres, de manera persuasiva, disputan el derecho de considerar el tren con coche-cama en reposo, mientras que los rieles, la tierra a su lado y todo a su alrededor está en movimiento en dirección opuesta a él.

"¿Es posible plantear esta situación que va en contra del sentido común del maquinista? Pregunta Einstein, exponiendo este mismo concepto. El maquinista objetará que él calienta y engrasa la locomotora, en lugar de hacerlo con los elementos que rodean al tren, y por lo tanto el movimiento se debe a la locomotora".

La prueba parece ser muy difícil a primera vista, pero esto no es lo decisivo. Sólo en la imaginación parece ser que la línea férrea va hacía el ecuador y el tren corre hacia el oeste, contra la rotación del globo terrestre. Cuando los paisajes se separan a los lados del tren, y se consume el combustible para hacer avanzar la máquina, entonces la marcha del tren parece ser secundada por el movimiento de los paisajes en dirección opuesta. Si el maquinista desea mantener el tren totalmente quieto (en relación al sol), debe calentar y engrasar la máquina, para alcanzar una velocidad de dos mil kilómetros por hora.

Para persuadir a quienes dudan todavía de las leyes resultantes al reemplazar recíprocamente el reposo y el movimiento, sirve la expresión de uno de los pocos

[3] Estos dispositivos se encuentran en ferias y parques de atracción y se les conoce como "toros mecánicos". *(N. del E.)*

adversarios de las teorías de Einstein, el profesor Lenard,[4] el cual critica a Einstein, sin atentar contra la teoría de la relatividad de Galileo. He aquí lo que escribe:

"Mientras el movimiento del tren sea totalmente uniforme no existe ninguna posibilidad para diferenciar quién es el que se encuentra en movimiento y quién el que se encuentra en estado de reposo; el tren o sus alrededores. La estructura del mundo material es tal, que siempre y en todo lugar, queda excluida la posibilidad de una determinación absoluta del problema sobre la diferenciación entre el movimiento uniforme y el reposo, y solo queda lugar para la teoría del movimiento uniforme de los cuerpos en relación mutua, porque los que observan este movimiento no pueden reflejar los fenómenos observados y sus leyes".

4. Navegando en un buque

Es posible imaginar situaciones en las cuales resulta difícil aplicar el principio de la relatividad. Imaginemos por ejemplo, que en el puente de un barco en movimiento, en los extremos opuestos, hay dos tiradores apuntando el uno al otro con sus armas. Si los tiradores miran en dirección opuesta, ¿no es correcto que el tirador que se encuentre con la espalda hacia la popa del buque se queje de que la bala disparada por él es más lenta que la bala disparada por su contrario?

---

[4] Philipp Eduard Anton von Lenard, (1862 - 1947). Físico húngaro, ganador del premio Nobel de Física en 1.905 por sus investigaciones sobre los rayos catódicos y sus propiedades.
Trabajó en un comienzo en la mecánica, publicando los Principios de Mecánica. Posteriormente se interesó en la fosforescencia y la luminiscencia. También realizó estudios del magnetismo y publicó artículos sobre la oscilación de las gotas de agua precipitadas.
Más tarde, Lenard realizó trabajos sobre el efecto fotoeléctrico, en el cual se presentan fenómenos que contradicen los postulados de la física clásica, fenómenos que solo pudieron ser explicados en 1.905, cuando Einstein elaboró su teoría del efecto fotoeléctrico basada en el concepto del "quantum de luz" (fotón). *(N. del E.)*

Figura 2. ¿Cuál de las dos balas alcanzará antes al enemigo?

Naturalmente, en relación con las aguas del mar, la bala disparada por el tirador opuesto al movimiento del buque, es más lenta que la bala disparada por él, cuando el barco está en reposo, y la bala disparada por el tirador que se encuentra en la proa del buque parece viajar con mayor rapidez, que si la disparara estando el barco en reposo. Pero este resultado no altera las circunstancias del movimiento de las balas: la bala orientada hacia la popa viaja hacia un blanco que se mueve a su encuentro, y así al moverse en la misma dirección del puente, la reducción de velocidad de la bala se anula, debido a que da en el blanco con mayor rapidez; la bala que se dispara hacia la proa alcanza a su blanco más tarde, porque éste se aleja de la bala con la velocidad en sentido contrario a la de ésta.

En resumen, ambas balas, en relación a sus blancos, se mueven con idéntica rapidez, lo mismo ocurre en el caso de que el barco esté en reposo.

No hace falta agregar, que lo antedicho se refiere únicamente a barcos que se mueven en línea recta, con rapidez constante.

Aquí nos parece oportuno citar un párrafo del libro de Galileo, en el cual se expresa por primera vez el principio de la relatividad (no hace falta decir, que este libro fue uno de los pocos que fueron salvados por su autor, de la hoguera de la Inquisición).

"Enciérrese con sus amigos en un amplio salón en la cubierta de un buque. Si el movimiento del buque es uniforme, entonces, sin duda, usted no podrá saber sí el buque se mueve o si está fijo en un lugar. Hay que dar los mismos brincos cuando toda la cubierta está ocupada con bultos, cuando el barco está en movimiento y cuando está quieto. Los golpes que se perciben a consecuencia de un movimiento rápido del barco, son más fuertes en la proa que en la popa del barco, porque mientras la proa se levanta en el aire, la popa se inclina hacia el agua. Si uno lanza cosas contra sus compañeros, no necesita más fuerza para lanzarlas desde la popa hacia la proa que para lanzarlas desde la proa hacia la popa. Las moscas vuelan por todos lados, no tienen preferencia por el lado más cercano a la popa…".

Ahora resulta comprensible la forma en la que se expresa habitualmente el principio clásico de la relatividad: "todo movimiento que se realice dentro de cualquier sistema, no depende de que el sistema se encuentre en reposo o que se desplace en línea recta y continua".

5. El tubo aerodinámico[5]

En la práctica resulta bastante común confundir el movimiento con el reposo y el reposo con el movimiento, apoyándose en el principio clásico de la relatividad.

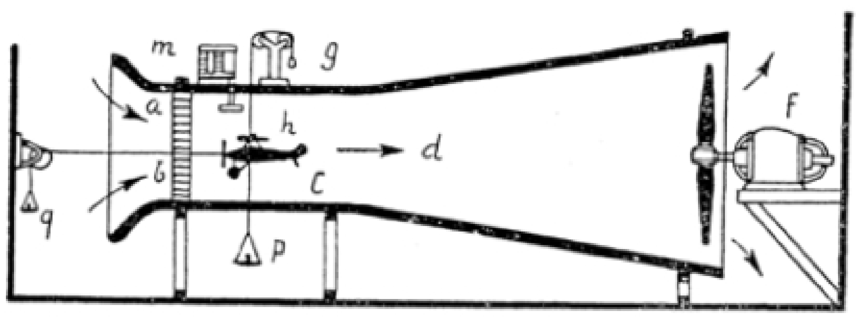


Figura 3. Corte del tubo aerodinámico del Instituto de Moscú. El aire es impulsado por la hélice por medio de una reja (f es el motor eléctrico). Se mide la acción del aire sobre el avión por medio de los instrumentos p, g, m. El peso q equilibra la presión de las corrientes de aire.

Para comprender como actúa la resistencia del aire sobre el avión o sobre el automóvil, por medio de la cual se mueven, es necesario observar el fenómeno de la "rotación", el efecto de las corrientes de aire sobre al avión que está en reposo. En el laboratorio se coloca un gran tubo aerodinámico (véase dibujo 3) dotado con una corriente de aire y por medio de él se estudia el efecto de la corriente sobre el

[5] El *tubo aerodinámico* también se conoce como "*túnel de viento*". *(N. del E.)*

modelo inmóvil y suspendido de un aeroplano o un automóvil. Los resultados obtenidos con el experimento se aplican en la práctica, aunque en realidad, los fenómenos suceden en dirección contraria: el aire es inmóvil y el aeroplano o el automóvil lo cortan con gran rapidez.

Para el lector resulta interesante saber, que uno de los mayores tubos aerodinámicos del mundo, se encuentra en Moscú, en el Instituto Aero-hidrodinámico (abreviación en ruso ZAGI). Este tubo tiene forma octogonal, su longitud es de 50 m. y su diámetro interior es de 6 m.

Gracias a tales medidas, en el tubo no caben solo modelos muy pequeños, sino incluso armaduras de aviones reales con sus hélices, y también automóviles reales, en tamaños naturales. El mayor tubo aerodinámico se ha construido en Francia, su sección elíptica tiene 18 por 16 metros.

6. Un tren en plena marcha

Otro ejemplo de una aplicación basada en los principios clásicos de la relatividad se puede encontrar en la práctica de los ferrocarriles. En Inglaterra y América, el ténder[6] de la locomotora frecuentemente se llena de agua en plena marcha. Esta "aplicación" ingeniosa se basa en un fenómeno mecánico comúnmente conocido: si se introduce en una corriente de agua un tubo vertical, cuyo extremo inferior se curva en dirección contraria a la corriente (dibujo 4) el agua que corre, penetra en el llamado "tubo Pitôt"[7] y alcanza en él un nivel más alto que el del río, que se determina por la cantidad *H*, la que depende siempre de la rapidez de la corriente. Los ingenieros ferroviarios "aprovechan" este fenómeno: introducen tubos curvados que se mueven a gran velocidad, en aguas tranquilas; el agua que entra en cada tubo alcanza un nivel más alto que el del agua en reposo. El movimiento se transforma en reposo y el reposo en movimiento.

Para llevar a cabo este procedimiento, se vierte agua en zanjas ubicadas a lo largo de los rieles, donde el ténder de la locomotora debe abastecerse de agua, sin parar

---

[6] *Ténder* era el vagón que acompañaba a la locomotora de vapor y servía para almacenar el agua y el combustible que esta utilizaba. Por su utilidad era el primero de los vagones que seguían a la locomotora. *(N. del E.)*

[7] Henri Pitôt (1.695 - 1.771). Ingeniero y físico francés. Fue militar y estudió matemáticas por cuenta propia. Inventó el tubo que lleva su nombre -el Tubo de Pitôt- en 1.732, que permite calcular la velocidad de un caudal. *(N. del E.)*

el tren (Fig. 4). Desde el ténder se extiende un tubo curvado, en la dirección del movimiento.

El agua que entra al tubo, sube al ténder de acuerdo a la velocidad con la que marcha el tren (Fig. 4, parte superior derecha).

¿A qué altura puede subir el agua por medio de este sistema? Según las leyes de la "mecánica hidráulica", rama de la mecánica que se ocupa de los movimientos de los líquidos, el agua en el "tubo Pitôt" debe subir a la altura máxima que alcanza un cuerpo cuando se lanza verticalmente hacia arriba, es decir, que depende siempre de la rapidez de la corriente de agua. Para esta altura (*H*) es decisiva la siguiente fórmula:

$$H = \frac{v^2}{2g}$$

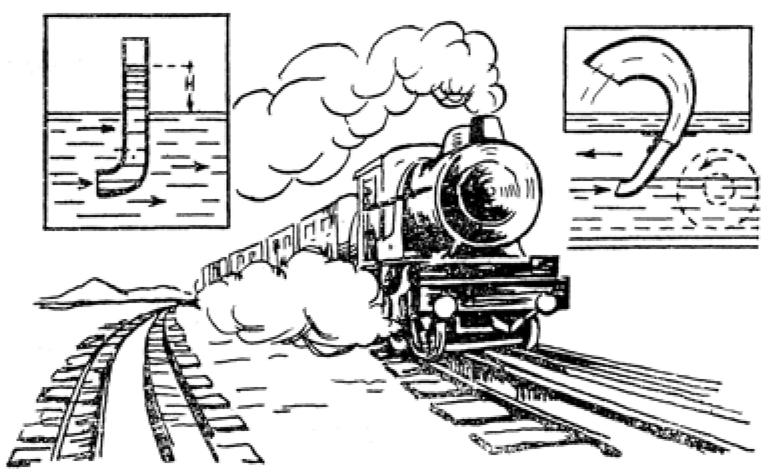


Figura 4. Forma en que las locomotoras toman agua en plena marcha. Arriba, a la izquierda, el tubo Pitôt. Al sumergirlo en agua corriente, el nivel del agua en el Pitôt rebasa el nivel de la toma de agua. Arriba, a la derecha, adaptación del tubo Pitôt para subir del agua al ténder de un tren en movimiento.

siendo v es la velocidad del agua, y g igual la aceleración de la fuerza de gravedad, equivalente á 9,8 m/seg^2. En nuestro caso, la velocidad del agua que asciende por el tubo, es idéntica a la velocidad del tren; asumiendo una marcha moderada de 35 km/h, tenemos que v = 10 m/seg, y de aquí se obtiene que el agua puede alcanzar una altura de:

$$H = \frac{v^2}{2 \text{ x } 9{,}8} = \frac{100}{2 \text{ x } 9{,}8} \approx 5 \text{ mts.}$$

Se ve claramente que en caso de no perder altura a causa del rozamiento, ésta velocidad sería suficiente para llenar el ténder.

7. Copérnico y Ptolomeo[8]

Sin duda, surge en el lector el dilema ¿cómo se puede resolver, desde el punto de vista del principio clásico de la relatividad, la disputa entre Copérnico y Ptolomeo? En este caso no se trata de un movimiento en línea recta y como consecuencia de esto, el problema cae en el terreno del estudio de la doctrina de Einstein; pero nosotros no lo hemos planteado aquí sin intención alguna.

¿Quién es el que efectúa la rotación?[9] ¿La tierra alrededor del Sol o el Sol alrededor de la Tierra?

Es un error plantear el problema de tal modo. Si se pregunta cuál de los dos movimientos se efectúa realmente, entonces se debe afirmar que un cuerpo solo se puede mover en relación a otro cuerpo; es imposible moverse sin estar relacionado. Por esto se responde al problema planteado, del siguiente modo: La Tierra y el Sol se mueven uno en relación al otro; observando este movimiento desde la Tierra, el

---

[8] Claudio Ptolomeo, (100 - 170). Astrónomo, químico, geógrafo y matemático greco-egipcio.
Nicolás Copérnico, (1.473 - 1.543). Astrónomo, matemático, astrónomo, jurista, físico, clérigo católico, gobernador, administrador, líder militar, diplomático y economista polaco.
Ptolomeo suponía que los cuerpos celestes -el Sol, la Luna y los planetas- se encontraban situados en esferas huecas concéntricas a la Tierra. Las estrellas fijas se situaban en una sola capa exterior.
Copérnico planteó que la Tierra no era el centro del mundo, sino que la Tierra y todos los demás planetas se movían describiendo círculos alrededor del Sol.
Aunque en nuestros días se acepta la tesis copernicana, ésta ha sido corregida. Las órbitas de los planetas no son circulares, como creía Copérnico, sino elípticas, como mostró Kepler. Asimismo, el Sol se mueve, igual que los demás astros del firmamento. *(N. del E.)*

[9] En los movimientos realizados en círculo, es necesario diferenciar entre la "rotación" (el círculo alrededor de un *eje que no traspase* a los cuerpos en movimiento) y la "circulación" (el círculo alrededor de un *eje que traspase* a los cuerpos en movimiento). La Tierra efectúa una rotación alrededor del Sol y diariamente hace una circulación alrededor de su eje.

Sol parece girar alrededor de la Tierra y observándolo desde el Sol, la Tierra parece girar alrededor del Sol.

Escuchemos a Edison, uno de los más destacados físicos de nuestra época: "Ptolomeo no tuvo en cuenta la simplicidad de movimientos de los planetas, el esquema de Copérnico sí; sin embargo, para los fenómenos terrenales comunes se presenta la situación contraria: el esquema de Ptolomeo se explica por su simplicidad natural. El esquema terrenal o sea el de Ptolomeo, explica los fenómenos de la Tierra, y el esquema solar o sea el de Copérnico, explica los fenómenos del sistema solar; sin embargo, no podemos dar a uno de ellos la preferencia sobre el otro, ni introducir una complicación superflua".

Conformémonos con aceptar esta concepción, si se recuerda que ninguno de los astrónomos, sin excluir al propio Copérnico, pudo desistir a lo dicho por Ptolomeo: "El Sol se levanta". Y nunca se sustituyó éste dicho por lo indicado por Copérnico: "La tierra en su movimiento rotativo coloca los rayos del Sol en el lugar en el que me encuentro." Para determinar el tiempo y los días, resulta más conveniente el concepto de Ptolomeo que el de Copérnico, y sin duda alguna, nos hemos quedado en este caso en las posiciones de la antigua Grecia. Quien pretenda describir la salida del Sol en los términos de la teoría de Copérnico, no ha comprendido las más destacadas convicciones de los partidarios de Copérnico.

Los astrónomos de nuestra época, que pronostican cualquier fenómeno del cielo, muchas veces ni piensan sobre el movimiento del globo terrestre; a ellos les resulta favorable hacer sus cálculos de esta forma, como si todo el firmamento girase alrededor de la Tierra inmóvil.[10]

Seguramente el lector no ha olvidado lo que concierne al problema de los dos huevos, mencionado anteriormente. Recordando el citado ejemplo, se comprenderá que cuando se pueda saber por la rotura de la cáscara de un huevo, cuál de los dos huevos estaba en movimiento "real" y cuál en un estado de "reposo absoluto", se

---

[10] Uno de los atentos lectores, podría plantear en relación a este tema, la pregunta:
¿Cómo percibe el movimiento un observador, que mire desde fuera hacia nuestro sistema planetario, desde cualquier estrella lejana? ¿Según este observador, gira la Tierra alrededor del Sol o gira el Sol alrededor de la Tierra?
Para responder a esta pregunta es necesario recordar ante todo, que no puede haber ningún observador en un punto completamente inmóvil. Las estrellas desde donde mire el observador, están en movimiento en relación a cualquier otro cuerpo. Si el observador está inmóvil en relación a la Tierra, verá que el Sol gira alrededor de la Tierra. Si está inmóvil en relación a cualquier otro cuerpo (por ejemplo, a otra estrella) entonces le parece que tanto el Sol como la Tierra se mueven en una u otra dirección.

habrá realizado un importante descubrimiento, que generará un verdadero cambio en la mecánica.

Sin saberlo, la revista norteamericana, creyendo en las diferencias expuestas por ella, entre los huevos que se golpean, no sospechaba que se encontraba en el camino de la predicción, rumbo a la fama.

8. ¿Cómo se debe entender la ley de inercia?

Luego de hablar detalladamente sobre la relatividad del movimiento, hace falta decir algunas palabras sobre las causas que producen el movimiento, sobre las fuerzas que motivan el movimiento. Ante todo es necesario enunciar las leyes del siguiente modo: el efecto de las fuerzas sobre los cuerpos no depende que los cuerpos se encuentren en estado de reposo o que se muevan por inercia o por la influencia de otras fuerzas.

Estos efectos conforman la "segunda" de las tres leyes, que son, según Newton, la base de toda la mecánica. La primera es la ley de la inercia y la tercera es la ley de resistencia.

A esta segunda ley de Newton están dedicados los siguientes capítulos; por esta razón, solo decimos aquí sobre ella algunas cuestiones generales. La idea de esta ley consiste en que en el cambio de la velocidad, la medida que indica la aceleración, es proporcional a la fuerza que actúa, y tiene la misma orientación que ella. Se puede representar esta ley en la fórmula:

$$f = m \times a$$

en la cual

f = fuerza, que actúa sobre los cuerpos;

m = masa de los cuerpos, y

a = aceleración de los cuerpos.

La más difícil de comprender, de las tres cantidades que componen esta fórmula, es la *masa*. Frecuentemente se confunde con el peso, pero en realidad la masa no tiene nada en común con el peso. Se puede averiguar la masa de un cuerpo, comparando la aceleración a la cual está expuesto el cuerpo bajo la influencia de una u otra fuerza exterior. Como se puede ver de la fórmula anterior, cuanto mayor es la masa tanto menor es la aceleración que adquieren los cuerpos bajo la influencia de fuerzas externas.

La ley de la inercia, es la más comprensible de las tres, aunque parece contradecir los conceptos habituales.[11]

Y no obstante algunos la comprenden al revés. Se interpreta erróneamente esta ley, como la cualidad que tienen los cuerpos "de conservar sus condiciones, mientras que las causas exteriores no las alteren". Tal versión, muy extendida, confunde la ley de inercia con la ley de la causalidad, que afirma que nada sucede sin causa, (es decir, que ningún cuerpo cambia sus condiciones sin causa). La auténtica ley de inercia no se refiere a cualquier condición física de los cuerpos, sino exclusivamente a las condiciones de reposo y movimiento). Dice: Todos los cuerpos conservan sus condiciones en estado de reposo o en movimiento recto y uniforme hasta el momento en que las fuerzas que actúan sobre ellos, los sacan de dicha posición.

Esto significa que cada vez en que un cuerpo:

1. entra en movimiento;
2. cambia su movimiento en línea recta, en otro en línea curva;
3. interrumpe, retarda o acelera su movimiento,

debemos concluir que sobre el cuerpo actúan fuerzas exteriores.

Si no se da ninguno de estos cambios en el movimiento, entonces ninguna fuerza externa obra de manera apreciable sobre el cuerpo, y no lo mueven. Hay que comprender claramente que los cuerpos que se mueven de manera uniforme y en línea recta, no se encuentran bajo influencia alguna de fuerzas exteriores que obren sobre ellos (o que todas las fuerzas que actúan sobre ellos están en equilibrio -se anulan entre sí-). En esto consiste la diferencia esencial entre los conceptos de los mecánicos contemporáneos y los puntos de vista de los pensadores de la Antigüedad y de la Edad Media (hasta Galileo). Aquí se diferencian fuertemente el pensamiento vulgar y el pensamiento científico.

---

[11] Esta ley entra en contradicción con los conceptos de quienes afirman que un cuerpo que se mueva con velocidad uniforme en línea recta, no está sometido a la acción de ninguna fuerza externa; habitualmente se cree que una vez que el cuerpo inicia el movimiento, se mantiene en este estado, y dejará de moverse al eliminar dicha fuerza.

Hace falta explicar, por cierto, por qué el rozamiento de los cuerpos en reposo, se considera como una fuerza en la mecánica, a pesar que este rozamiento no puede provocar ningún movimiento. El rozamiento es una fuerza porque puede atrasar el movimiento. Las fuerzas, que no pueden engendrar movimientos por sí mismas, pero son capaces de atrasar los movimientos ya surgidos (o equilibrar otras fuerzas), se llaman fuerzas "pasivas", a diferencia de las fuerzas que producen movimientos, que se llaman "activas".

Ponemos aquí de manifiesto una vez más, que el cuerpo no tiende a quedarse en posición de reposo sino que simplemente está en reposo. Es la misma diferencia entre un hombre terco que está siempre en casa y al cual es difícil arrastrarle fuera de su vivienda y otro hombre, que rara vez se encuentra en casa y que está dispuesto a dejar su vivienda por cualquier razón, por insignificante que sea. Dada su naturaleza, los cuerpos físicos "no gustan de quedarse en casa", por el contrario, basta el impulso de una fuerza insignificante, para que ellos se pongan en movimiento, aunque se encuentren en reposo absoluto. Resulta inadecuada la expresión "el cuerpo tiende a mantenerse en reposo", porque se ha comprobado que un cuerpo en reposo, una vez puesto fuera de este estado no regresa a él por cuenta propia, sino que tiende a mantenerse en movimiento constante. (Siempre que no existan fuerzas que impidan el movimiento).

No se deben subestimar los errores referentes a la ley de inercia, que surgen de la aplicación inadecuada de la palabra "tiende", como sucede en la mayoría de los manuales de física y mecánica.

No son menos las dificultades que se presentan para la correcta comprensión de la tercera ley de Newton, cuyo estudio comenzamos en el siguiente capítulo.

9. Acción y reacción

Cuando deseas abrir una puerta, la atraes hacia ti, tirando del picaporte. Los músculos de la mano se encogen, acercando las puntas de los dedos: arrastran con igual fuerza, al mismo tiempo, la puerta y tu cuerpo. En este caso se ve claramente que obran dos fuerzas entre cuerpo y la puerta, actuando una sobre la puerta y otra sobre tu cuerpo. Lo mismo sucede, como bien se puede comprender, en el caso en que la puerta se abre en dirección opuesta a ti: las fuerzas empujan a la puerta y a tu cuerpo.

Lo que nosotros indicamos aquí en relación a las fuerzas de los músculos, se cumple para todas las fuerzas en general, independientemente de su naturaleza. Cada tensión obra hacia dos lados opuestos; en otras palabras, cada tensión tiene dos fines (correspondientes a dos fuerzas): uno, "abrir", que se orienta hacia la puerta, sobre la cual actúa la fuerza, y el otro, "halar", orientado hacia el cuerpo, al que nosotros llamamos el que actúa. El efecto mencionado se expresa en la mecánica de modo muy breve: "La acción es igual a la reacción".

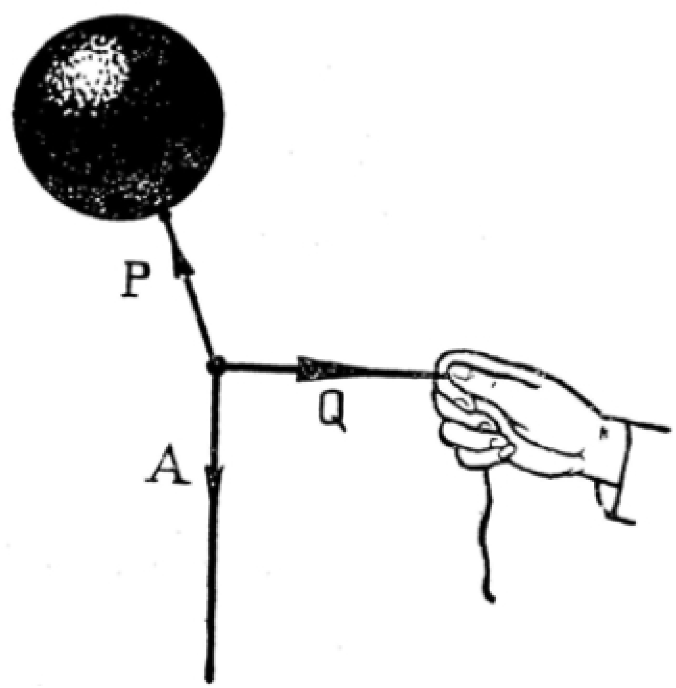


Figura 5. Las fuerzas P, Q, A actúan sobre la cuerda de un globo de juguete. ¿Dónde está la fuerza que ofrece resistencia?

Esta ley indica que todas las fuerzas de la naturaleza son binarias. En cualquier caso, la manifestación de la acción de una fuerza nos indica que en cualquier otro lugar, existe otra fuerza igual a ésta, que actúa hacía en sentido opuesto.

Estas dos fuerzas actúan infaliblemente entre dos puntos que tienen la tendencia a aproximarse o alejarse mutuamente.

Observa simplemente (Fig. 5), las fuerzas *P*, *Q* y *R*, que actúan sobre el peso de la cuerda en la cual se encuentra suspendido el globo de juguete. El tiro *P* es el globo, el tiro *Q* es la cuerda y *R*, es el peso; tres fuerzas que están aisladas entre sí. Pero esto es únicamente una abstracción de la realidad; de hecho, para cada una de las tres fuerzas hay una fuerza equivalente a ella, en igual dirección, pero en sentido opuesto. Así por ejemplo, la fuerza opuesta a la fuerza *P*, es la que sostiene el globo en el aire (en la Fig. 6 la fuerza P_1); la fuerza opuesta a la fuerza *Q*, es la que obra sobre la mano (Q_1); la fuerza, contrapuesta a la fuerza *R*, se aplica al peso en el centro del globo de aire (fuerza R_1 en la Fig. 6) porque el peso no sólo atrae la Tierra hacia sí, sino que la Tierra también atrae al peso.

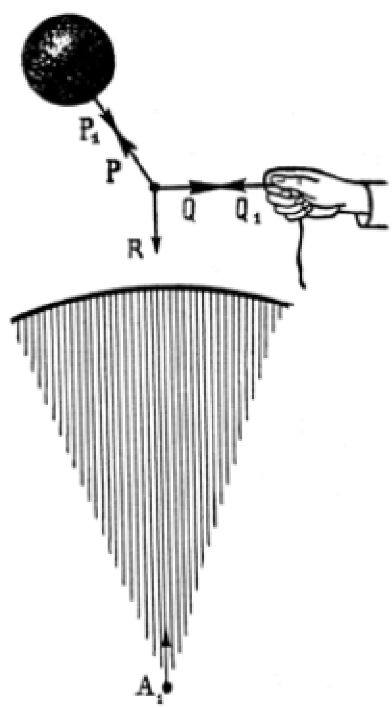


Figura 6. Respuesta a la pregunta del dibujo anterior. P_1, Q_1, y A_1, son las fuerzas que ofrecen resistencia.

Agreguemos algo más. Cuando preguntamos por la resistencia de una cuerda a la cual atamos en uno de sus extremos, un peso de un kilo, es como si preguntáramos por el valor de un sello de correos de 10 kopeks. La respuesta está incluida en la pregunta: queremos una cuerda capaz de arrastrar un peso, con la fuerza de un kilogramo. Mejor dicho "la cuerda que es capaz de arrastrar dos veces con un kilogramo de fuerza", o "la cuerda de la cual tiran por dos lados fuerzas de un kilogramo", es decir, en uno u otro sentido. De otro modo no es posible arrastrar 1 kilogramo, a menos que lo hicieran dos fuerzas en sentido opuesto. Si se olvida este concepto fácilmente se cae en errores muy graves, de los cuales daremos ahora algunos ejemplos.

10. El Experimento de los dos caballos

Dos caballos tiran de una romana de resorte con una fuerza de 100 kilogramos cada uno.

¿Qué indica la aguja de la romana?

Muchos contestarán: 100 + 100 = 200 kilogramos. Esta respuesta no es correcta. Las fuerzas de 100 kilogramos, con las cuales tiran los dos caballos, indican, como ya hemos visto antes, que la tensión no es de 200 kilogramos, sino únicamente de 100 kilogramos.

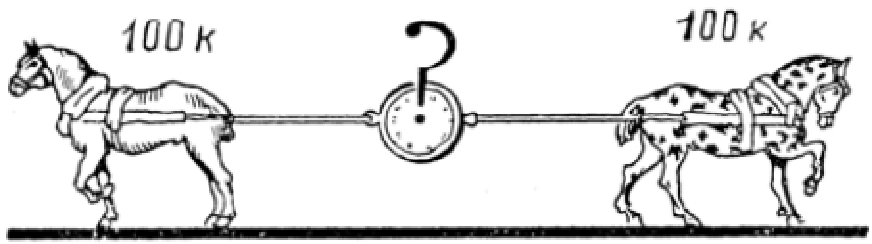


Figura 7. ¿Cuánto indicará la báscula?

Por eso, entre otras cosas, no se debe pensar que los hemisferios de Magdeburgo[12] de los que tiran 8 caballos por un lado y 8 por el lado contrario, son tirados en total por una fuerza de 16 caballos. Con la ausencia de los 8 caballos reactivos, los 8 restantes no efectúan ninguna acción sobre el hemisferio. Sin embargo, podría sustituirse por una pared, uno de los tiros de 8 caballos.

[12] Su nombre proviene de un experimento realizado en el año 1.654 en la ciudad de Magdeburgo. Para realizar esta experiencia, Otto von Guericke mandó a construir dos hemisferios huecos de cobre y los ajustó de manera que no entrara aire y extrajo el del interior a través del conducto del hemisferio inferior, tras lo cual cerró el grifo y ató cada hemisferio a un arnés tirado por ocho caballos que no consiguieron despegar ambas mitades. Cuando se le insufló aire nuevamente a la esfera, mediante una válvula, se pudo separar en dos mitades sin dificultad.

11. El experimento de las dos lanchas

Se acercan dos lanchas iguales al embarcadero de un lago. Ambas lanchas se acercan, arrastradas por su tripulante, por medio de una soga. El extremo de la soga de la primera lancha está atado a un poste del embarcadero; la punta de la soga de la segunda lancha se encuentra en manos de un marinero en el embarcadero, que también por su parte tira de la soga hacia él.

Los tres hombres hacen el mismo esfuerzo. ¿Cuál de los dos barcos llega antes?

A primera vista se puede afirmar, que llega antes la lancha arrastrada por dos hombres: las fuerzas duplicadas producen mayor velocidad.

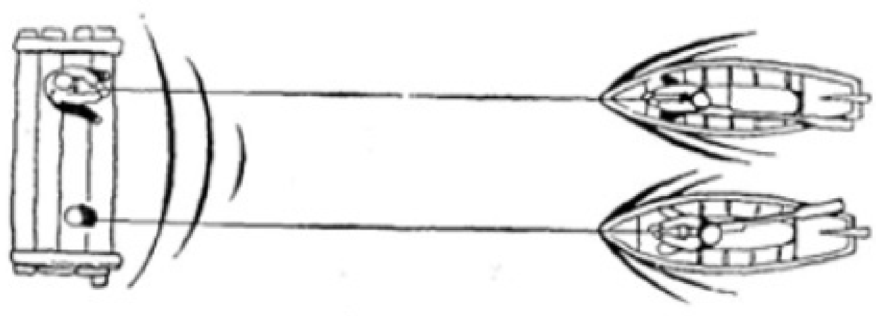


Figura 8

¿Pero es cierto que sobre esta lancha obran fuerzas duplicadas? Si tanto el barquero como el marinero tiran hacia sí, entonces la fuerza que tira de la soga es únicamente igual a una sola fuerza, y huelga decir, que es exactamente igual a la del primer barco. Ambos barcos se acercan con la misma fuerza y llegan, por lo tanto, al mismo tiempo.[13]

12. El enigma del caminante y la locomotora

[13] Uno de nuestros físicos conocidos no está de acuerdo con esta solución que he dado al problema, por lo cual me dirigió una carta en la que me presenta un cálculo, que posiblemente también podría surgir en la mente de otros lectores:

"Para acercar las lanchas al embarcadero, escribió él -hace falta que los barqueros tiren de las cuerdas. Pero dos personas naturalmente, en el mismo tiempo, tiran con más fuerza que una y por lo tanto el barco derecho avanza más rápido."

Este argumento simple, que a primera vista parece indiscutible, es erróneo. Para que la lancha alcance el doble de rapidez (y de lo contrario la lancha no corra con el doble de rapidez) cada una, de las dos personas que tiran de la cuerda, debe tirar con el doble de fuerza. Y en tales condiciones, hacía falta que tirasen con dos cuerdas y no con una como el que tira solo. Pero en las condiciones de nuestro experimento se ha establecido que "las tres personas tiran con el mismo esfuerzo". Por más que se esforzasen los dos, nunca podrían tirar más de la cuerda, que el que está solo, porque la fuerza que tira de la cuerda es la misma.

En la práctica ocurre frecuentemente que tanto las fuerzas de acción como las de reacción se encuentran en diferentes lugares del mismo cuerpo. La tensión muscular o la presión del vapor en el cilindro de una locomotora son ejemplos de estas fuerzas, llamadas “fuerzas internas”.

Comúnmente, estas fuerzas es que son capaces de cambiar la disposición recíproca de las diversas partes del cuerpo, en la medida en que el cuerpo permite la reunión de estas partes, pero nunca pueden ejecutar el mismo movimiento con todas las partes del cuerpo. Con la detonación de la escopeta, los gases de la pólvora que actúan hacia un lado arrojan la bala hacia delante; al mismo tiempo, la presión de los gases de la pólvora, en sentido opuesto, arroja la escopeta hacia atrás.

La presión de los gases de la pólvora, como fuerza interior, no es capaz de mover hacia adelante tanto la bala como la escopeta.

Pero si las fuerzas internas no son capaces de desplazar todo el cuerpo ¿cómo se mueve entonces el caminante? ¿Cómo se mueve la locomotora? Hace falta decir que al caminante le ayuda el roce del pie sobre la tierra, y a la locomotora el roce de las ruedas sobre los rieles, lo que no quiere decir que con esto quede resuelto el problema. El roce es imprescindible para el movimiento del caminante y de la locomotora; es cierto que no es posible marchar por terrenos muy resbaladizos y que si las ruedas de las locomotoras anduviesen sobre rieles resbaladizos, patinarían y no se moverían de lugar. Pero también es claro que el rozamiento es una fuerza pasiva, incapaz de provocar cualquier movimiento por sí misma.

Así resulta que las fuerzas que toman parte en el movimiento del caminante y de la locomotora no pueden engendrar por sí solas los movimientos. Entonces ¿de qué modo se produce el movimiento?

Este enigma se resuelve de forma muy sencilla. Dos fuerzas internas, que actúan al mismo tiempo, no pueden lograr que el cuerpo se mueva porque la acción de una fuerza equilibra la acción de la otra fuerza. ¿Pero qué sucede, cuando una tercera fuerza equilibra o debilita la acción de una de las dos fuerzas interiores? Nada impediría a la otra fuerza interna mover el cuerpo. El roce es esta tercera fuerza, que debilita la acción de una de las fuerzas internas y que da así a la otra fuerza la posibilidad de mover el cuerpo.

Para mayor claridad indicamos a ambas fuerzas internas con las letras F_1 y F_2 y la fuerza del roce con la letra F_3. Si la magnitud y la dirección de la fuerza F_3 es tal que debilita suficientemente a las fuerzas F_2 entonces F_1 puede poner el cuerpo en movimiento. En resumen el caminante y la locomotora se mueven porque de las tres fuerzas que actúan sobre el cuerpo F_1, F_2 y F_3, las F_2 y F_3 se equilibran por completo o en parte y entonces la fuerza F_1 entra en acción. Los ingenieros, que inventaron el movimiento de la locomotora, prefirieron decir, de manera no totalmente congruente, las fuerzas F_1 y F_2 se equilibran, y que la fuerza que mueve a la locomotora es el roce F_3. Sin embargo, en la práctica esto no tiene importancia, porque para el movimiento de la locomotora es imprescindible la participación tanto del vapor como del rozamiento.

13. ¿Qué significa vencer la inercia?

Para acabar el capítulo queremos presentar otro problema, que produce también muchas veces conceptos erróneos. Se lee y se oye, no raras veces, que para poner en movimiento los cuerpos que se encuentran en estado de reposo, ante todo es necesario "vencer la inercia" de estos cuerpos. Nosotros sabemos, sin embargo, que los cuerpos libres, en cuanto no se ven impedidos por fuerzas opuestas tienen la tendencia a ponerse en movimiento. Por lo tanto, ¿qué es lo que hay que "vencer"?

"Tener que vencer la inercia" no es más que la alteración del principio que indica que para poner en movimiento cada cuerpo, con una velocidad determinada, se necesita un intervalo determinado de tiempo. Ninguna fuerza, incluso la máxima, es capaz de poner en movimiento una masa con una velocidad, incluso una masa insignificante. Este concepto se expresa en esta breve fórmula:

$$f \times t = m \times v,$$

sobre la cual hablaremos en los siguientes capítulos, pero con la cual los lectores deben ponerse al corriente por medio de los manuales de física. Es claro que en el caso en que

$$t = 0$$

(el tiempo es igual a cero) el resultado de la multiplicación $m \times v$ (masa multiplicada por velocidad) es igual a cero, y por lo tanto la velocidad es igual a cero, porque la masa no puede ser igual a cero. En otras palabras, si la fuerza *f* no tiene tiempo para realizar su acción, entonces el cuerpo no recibe ninguna velocidad, es decir, no entra en movimiento. Sí la masa del cuerpo es grande, hace falta un espacio de tiempo relativamente mayor, para que la fuerza pueda poner al cuerpo en movimiento. Debemos decir que el cuerpo comienza a moverse inmediatamente, pero que parece que él se resiste algo a la acción de la fuerza.

De allí resulta la falsa concepción que la fuerza debe "vencer la inercia del cuerpo" antes de poder ponerlo en movimiento.

14. El vagón del ferrocarril

Quizá algún lector me pedirá que aclare una pregunta en relación con lo expuesto hasta ahora, que surge seguramente entre muchas otras. ¿Por qué resulta más difícil mover de su lugar a un vagón del ferrocarril, que detener el movimiento cuando el vagón está en marcha?

No sólo es más difícil, agrego yo, sino en general imposible si no se aplica una fuerza bastante grande. Para retener el movimiento de un simple vagón de mercancía en una vía horizontal basta aplicar, en el caso de un buen engrase, una fuerza de 15 kilogramos, mientras que no es posible mover de su lugar un vagón parado, con una fuerza inferior á 60 kilogramos.

Esto no se debe solamente a en que en los primeros segundos hace falta aplicar mayor fuerza para poner el vagón en marcha, a una velocidad determinada (lo que significa un esfuerzo adicional, en comparación a la distancia), sino que la causa obedece a las condiciones del engrasado de los vagones en reposo. Al comienzo, el engrase no se halla repartido todavía en toda la extensión y por ello el vagón se mueve con bastante dificultad. Pero apenas las ruedas dan sus primeras vueltas y las condiciones del engrase se mejoran notablemente, se establece el movimiento uniforme con velocidad constante.

CAPÍTULO 2
FUERZA Y MOVIMIENTO

Contenido:

1. Una tabla utilidad en mecánica

"Ninguno de los conocimientos humanos puede pretender llamarse verdaderamente ciencia, si no utiliza la argumentación las matemáticas" escribió hace cuatrocientos años Leonardo da Vinci. Esta afirmación, válida en los primeros años de la ciencia naciente, todavía sigue vigente en nuestros días. En el presente libro no intentamos transformar las fórmulas de la mecánica. Tanto para el lector que solo se ocupa esporádicamente de la mecánica, como para el erudito en esta materia, hemos elaborado una pequeña tabla que ayuda a recordar las fórmulas más importantes.

Se ha desarrollado mediante las tablas pitagóricas, empleadas para efectuar multiplicaciones: El resultado del producto entre dos factores ubicados en una fila el uno y en una columna el otro, se encuentra en la celda correspondiente a la intersección entre la fila y la columna respectivas. (Las fórmulas que se indican en la siguiente tabla se encuentran en cualquier curso de mecánica, para cualquier grado de enseñanza).

Daremos algunos ejemplos, para ilustrar la forma en que se aplica la tabla en mención:

Multiplicando la velocidad *v* con el movimiento uniforme en tiempo *t*, obtenemos el camino

$$S \text{ (fórmula } S = vt).$$

Multiplicando la fuerza *f* por el camino *S*, obtenemos el trabajo *A*, que al mismo tiempo es también igual a la mitad de la masa producida *m* multiplicada por la velocidad *v* elevado al cuadrado:[1]

$A = f \times S = mv^2/2$					
	Velocidad v	*Tiempo t*	*Masa m*	*Aceleración a*	*Fuerza f*
Espacio S	-	-	-	*Movimiento uniforme* $V^2/2$	*Trabajo* $A=mv^2/2$
Velocidad v	*Movimiento uniforme* 2aS	*Espacio S movimiento uniforme*	*Impulso ft*	-	*Potencia* W=A/t
Tiempo t	*Camino S movimiento uniforme*	-	-	*Velocidad v movimiento uniforme*	*Cantidad del movimiento mv*
Masa m	*Impulso ft*	-	-	*Fuerza f*	-

Del mismo modo como con ayuda de la tabla de multiplicar es posible calcular las divisiones, con nuestra tabla se puede averiguar, por ejemplo, la siguiente relación:

[1] La fórmula $A = f\,S$ solo es válida cuando la dirección de la fuerza coincide con la dirección del desplazamiento. En general es más exacta la fórmula $A = f\,S\cos(\alpha)$, en la cual la cifra *alfa* indica el ángulo entre la orientación de la *fuerza* y el *espacio*.
También la fórmula $A=(m\,v^2)/2$ solo es exacta en casos en los cuales la velocidad del cuerpo es igual a cero; cuando la velocidad inicial es igual a V_0 y la velocidad final a V, entonces aquel trabajo que se debe gastar para lograr tal cambio de velocidad se refleja en la fórmula:

$$A = (m\,v^2)/2 - (m\,v_0^2)/2$$

- La velocidad v del movimiento uniforme dividida por el tiempo t es igual a la aceleración a (fórmula $a = v/t$).
- La fuerza f, dividida por la masa m, es igual a la aceleración a: $a = f/m$

- Y la fuerza f, dividida por la aceleración a es igual a la masa m: $m = f/a$

Por lo tanto, para resolver problemas que requieren el cálculo exacto de la velocidad, se elaboran todas las fórmulas que contienen la velocidad, con ayuda de la tabla, especialmente:

- $a S = v^2 /2$
- $v = at$
- $f = m a$

y también las fórmulas:

- $t^2 = 2S/a$
- $S = a t^2/2$

Entre estas fórmulas se encontrará la que resuelva el problema planteado.
Si se desea tener todas las ecuaciones mediante las cuales se puede definir la fuerza, de la tabla se obtienen:

- $F S = A$ (trabajo)
- $f v = W$ (potencia)
- $f t = m v$ (cantidad de movimiento)
- $f = m a$

No se debe olvidar que el peso (P) es también una fuerza; por esto al mismo tiempo que se tiene la fórmula $f{\cdot}t = m{\cdot}v$, también se dispone de la fórmula $P = m g$, donde g es la aceleración de la fuerza de gravedad cerca de la superficie de la tierra. Exactamente así de la fórmula $f S = A$ se deduce que $P h = A$ para el peso del cuerpo P, alzado a la altura h.

De la tabla se puede ver que, en la mecánica, no tiene sentido relacionar una cantidad con cualquier otra sin razón alguna.

Una importante observación más. Las fórmulas de la mecánica solo resultan de utilidad a los lectores que saben en qué unidades deben expresar los resultados de sus cálculos. Sí, por ejemplo, se calcula un trabajo según la fórmula: $A = f\ S$, estando la fuerza, f, en kilogramos, y el espacio recorrido, S, en centímetros, se obtendrá el valor del trabajo efectuado en kilogramo-centímetros, unidades incorrectas que se pueden confundir con extrema facilidad. Para obtener un resultado correcto, la fuerza se debe expresar en kilogramos y el espacio recorrido en metros, de este modo se expresará el trabajo en kilográmetros. Pero también se puede expresar la fuerza en dinas y el espacio recorrido en centímetros, representando así el trabajo en dina-centímetro (la dina corresponde a una fuerza igual á 1/980 gramos, es decir, cerca de un miligramo).

Igualmente en la ecuación $f = ma$ se da la fuerza en dinas únicamente cuando la masa se expresa en gramos y la aceleración en centímetros en un segundo por segundo.

Para llegar a expresar los resultados con las medidas que corresponden, sin incurrir en errores, se requiere de bastante práctica. Quien aún no tenga la destreza suficiente, debe realizar la medida en el sistema *cgs* ("centímetro - gramo - segundo"), pero puede pasar el resultado obtenido a otras unidades, de ser necesario.

Es esencial adquirir práctica en los cálculos ya que si no se tiene absoluto dominio de éstos, es posible cometer graves errores.

2. La utilización de las armas de fuego

A modo de ejemplo, para aplicar nuestra tabla, analizaremos "el retroceso" de las armas de fuego. La presión ejercida por los gases de la pólvora, arroja la bala hacia adelante, al tiempo que empuja el arma hacia el lado opuesto, produciendo un "retroceso" de la misma. ¿Con qué rapidez se mueve el arma en este caso? Recordamos la ley de acción y reacción. Según esta ley, la presión ejercida por los gases de la pólvora sobre el arma debe ser equivalente a la presión ejercida por los gases de la pólvora sobre la bala. Según esta misma ley ambas fuerzas obran al mismo tiempo. Echando una mirada a la tabla, vemos que la "cantidad del movimiento", *m·v*, es el resultado de la multiplicación fuerza (*f*) por tiempo (*t*), igual al resultado de la multiplicación de la masa *m* por su velocidad *v*:

$$f\,t = m\,v$$

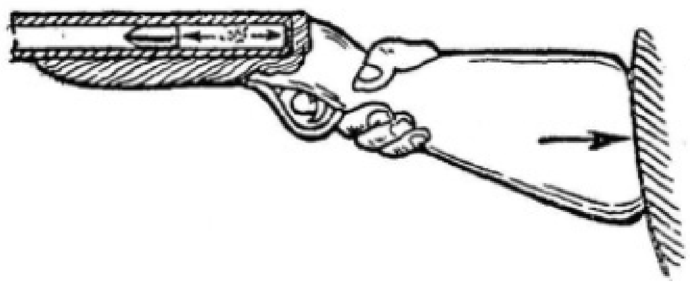


Figura 9

Como *f·t* tanto para la bala como para el arma son los mismos, también el movimiento producido por ellos debe ser igual. Si *m* es la masa de la bala y *v* su velocidad, y *M* la masa del arma y *w* su velocidad, entonces de acuerdo con lo visto hasta ahora: $mv = Mw$, de donde resulta que

$$w / v = m / M$$

De esta proporción se puede calcular el valor numérico de uno de sus términos, conocidos los demás. La masa de la bala de un fusil de guerra pesa 9,6 gramos, su velocidad al momento de partir es de 800 metros por segundo; la masa del fusil es de 4.500 gramos. De aquí resulta:

$$w / 800 = 9{,}6 / 4.500$$

Por lo tanto, la velocidad del arma *w* = 1,7 metros por segundo. Fácilmente se puede calcular, que el fusil golpea la bala con una "fuerza efectiva" 470 veces menor que la que le imprime a la bala:

$$F_{bala} = (m\ v^2) / 2 = 0{,}0096\ Kg \times (800\ m/seg)^2 / 2 = 3.072\ Newtons$$

$$F_{fusil} = (m\ v^2) / 2 = 4{,}5\ Kg \times (1{,}7\ m/seg)^2 / 2 = 6{,}5\ Newtons$$

Luego:

$$F_{bala} / F_{fusil} = 3.072\ Newtons / 6{,}5\ Newtons \approx 470$$

Esto significa que la energía destructora del arma que asesta el golpe es 470 veces menor que la de la bala que dispara, a pesar de esto, ¡debe tenerse presente que ambos cuerpos tienen la misma cantidad de movimiento! El retroceso del arma puede llegar a derribar o herir a un tirador sin experiencia.

Para nuestros rápidos cañones de pólvora, que pesan 2.000 kilogramos y que lanzan municiones de 6 kilogramos a una velocidad de 600 metros por segundo, la velocidad del golpe es, sin embargo, la misma del fusil, es decir es = 1,9 metros. Pero teniendo en cuenta la enorme masa de esta arma, la energía de este movimiento es 450 veces mayor, que en el caso del fusil, y casi igual a la energía de la bala de pólvora al momento de salir. Los viejos cañones retroceden un poco debido al golpe. En las armas contemporáneas los tubos resbalan ligeramente atrás, y el fuste del cañón queda en el mismo lugar sin moverse, deteniendo el disparo con el final de la trompa. Las armas de los barcos (todas sus armas) resbalan en el momento en que se presenta el tiro hacia atrás, pero gracias a una adaptación especial, después del retroceso, vuelven a su posición inicial.

El lector habrá observado, sin duda, que en el caso de los cuerpos que citamos se trata de *movimientos iguales cuantitativos*, que sin embargo están lejos de poseer todos idéntica energía cinética. De hecho, esto no tiene nada de sorprendente porque de la ecuación:

$$m\ v = M\ w$$

no se deduce que

$$(m\,v^2) / 2 = (M\,w^2) / 2$$

Esta última ecuación solo se cumple cuando $v = w$ (razón por la que difiere la segunda ecuación de la primera). Sin embargo, entre las personas que saben poco de mecánica, se halla ampliamente extendida la creencia de que la ecuación correspondiente a la *cantidad del movimiento* (también conocida como *ecuación del impulso*) depende de la *ecuación de la energía cinética*. Muchos inventores autodidactas, como he podido observar, parten del hecho de que a igual impulso corresponde igual cantidad de trabajo. Esto conduce, naturalmente, a un fracaso deplorable de sus experimentos y es claro indicio de que muchas veces el inventor no logra asimilar a fondo los fundamentos teóricos de la mecánica.

3. Los conocimientos usuales y los conocimientos científicos

Muchas personas consideran que la mecánica no es más que una ciencia sencilla y casual, concepto que conduce a menudo a conclusiones erróneas. Veamos un ejemplo ilustrativo de esto. ¿Cómo se mueve un cuerpo sobre el cual obra siempre la misma fuerza? El "sentido común" nos dice que dicho cuerpo se mueve siempre con la misma velocidad; es decir, que tiene un movimiento continuo y uniforme. Recíprocamente, si el cuerpo se mueve de manera constante, quiere decir que sobre él actúa continuamente la misma fuerza. Esto se puede confirmar observando el movimiento del carro, de la locomotora, etc. Sin embargo, la mecánica dice una cosa completamente diferente. Enseña que las fuerzas constantes no producen movimientos a velocidad constante, sino cada vez más acelerados, porque la velocidad previamente acumulada por las fuerzas aplicadas, produce un incremento continuo de la velocidad. Cuando se tiene un movimiento uniforme, el cuerpo en general no se encuentra bajo el efecto de fuerzas externas, porque de otro modo no se presenta un movimiento constante y uniforme.

¿Es posible que el "sentido común", producto de la observación cotidiana, nos lleve a incurrir en un grave error?

No, el "sentido común" solo conduce a resultados erróneos en una serie de fenómenos limitados. La observación cotidiana se realiza en cuerpos cuyo comportamiento se altera bajo las condiciones del roce y de las variaciones del medio.

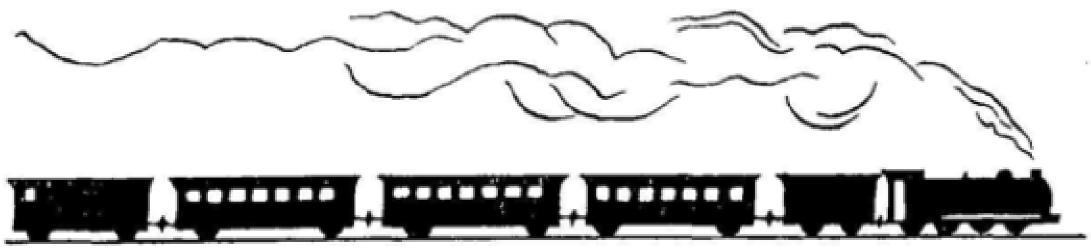


Figura 10

Pero las leyes de la mecánica se ocupan de cuerpos que se mueven libremente. Por ejemplo: un cuerpo que se mueve bajo condiciones de rozamiento, posee una velocidad determinada, para lo cual es necesario aplicar fuerzas constantes para lograr el movimiento. Pero en este caso, no se aplica la fuerza para mover el cuerpo, sino para vencer el roce, es decir para crear las condiciones necesarias para el movimiento. Por lo tanto, es probable que se requiera una fuerza constante cuando el cuerpo se mueve bajo condiciones de rozamiento uniforme, para mantenerlo en movimiento.

Veamos por qué falla la mecánica cotidiana: sus leyes varían debido a los cambios de los cuerpos. La generalización científica tiene una base más amplia. Las leyes de la mecánica científica han surgido no sólo a partir del análisis de los movimientos de los carros y de las máquinas de vapor, sino también mediante el estudio del movimiento de los planetas y los cometas. Para poder hacer una verdadera generalización, se debe ampliar el campo de observación y descartar los casos fortuitos. Sólo el conocimiento así logrado, permite descubrir las raíces profundas de los fenómenos, y resulta bastante fructífera su aplicación en la práctica.

En los siguientes párrafos, observaremos una serie de fenómenos, en los que se muestra claramente la relación existente entre el valor de las fuerzas que mueven los cuerpos libres y el valor de la aceleración que adquieren, relación basada en segunda ley de Newton, antes mencionada. Desafortunadamente, esta importante reciprocidad entre la fuerza aplicada y la aceleración obtenida, ha sido tratada de manera confusa en los textos escolares referentes al estudio de la mecánica. Hemos tomado nuestros ejemplos de situaciones ficticias; sin embargo, en la naturaleza se comprueban estos fenómenos con gran precisión.

4. El bombardeo de la Luna con artillería

Las armas de artillería tienen proyectiles que alcanzan en la Tierra una velocidad inicial de 900 metros por segundo. Disparando mentalmente estos proyectiles hacia la Luna, donde todos los cuerpos son 6 veces más ligeros, ¿con qué velocidad volarán al llegar allí?
(No se han tenido en cuenta las diferencias existentes debido a la ausencia de atmósfera en la Luna).

Solución

A esta pregunta se contesta frecuentemente que, siendo iguales las fuerzas explosivas en la Tierra y en la Luna y actuando estas fuerzas sobre proyectiles que se mueven 6 veces más rápidos en la Luna que en la Tierra, la velocidad debe ser 6 veces mayor en la Luna que en la Tierra: 900 por 6 igual á 5.400 metros por segundo. Por lo tanto, según este cálculo, los proyectiles vuelan en la Luna con una velocidad de 5,4 kilómetros por segundo.
Esta respuesta, que aparentemente parece cierta, es totalmente falsa.
No existe ninguna relación entre la fuerza, la aceleración y el espacio, de la cual pueda surgir tal comparación. En la mecánica, la fórmula que representa matemáticamente la segunda ley de Newton, asocia la fuerza y la aceleración del cuerpo con su masa y no con el espacio en el cual se encuentra dicho cuerpo: $f = ma$. La masa del proyectil no disminuye en la Luna, sino que es idéntica a la que tiene en la Tierra; es decir que la fuerza de la explosión, requerida para acelerar un proyectil en la Luna, debe ser idéntica a la que se requiere en la Tierra; porque siendo idénticos el tiempo y la aceleración, se debe tener la misma velocidad. (Según la fórmula $v = at$).
Y así, el cañón arroja el proyectil con la misma velocidad inicial en la Luna que en la Tierra. Otra cosa es hasta dónde y a qué altura vuela un proyectil, que se lanza con esta fuerza, en la Luna. En este caso, la disminución de la gravedad afecta los resultados.

Por ejemplo, la altura del ascenso del proyectil, que es arrojada a la Luna por un cañón, con una velocidad de 900 metros por segundo, se determina por la fórmula:

$$aS = \frac{v^2}{2}$$

fórmula que encontramos mediante la tabla de utilidad en la mecánica, dada en el numeral 1 de este capítulo.

Como la aceleración de las fuerzas de gravedad en la Luna es 6 veces menor que la de la Tierra, es decir *a = g/6* la fórmula tiene el siguiente aspecto:

$$\frac{gS}{6} = \frac{v^2}{2}$$

De aquí resulta que el desplazamiento vertical en la Luna, para el proyectil mencionado, es:

$$S_{Luna} = \frac{6v^2}{2g}$$

En la Tierra (en ausencia de atmósfera) este desplazamiento es:

$$S_{Tierra} = \frac{v^2}{2g}$$

Esto quiere decir que en la Luna el cañón lanza la bala a una altura 6 veces mayor que en la Tierra (no se ha tenido en cuenta la resistencia del aire) a pesar de que la velocidad inicial del proyectil en ambos casos es idéntica.

5. El revólver en el fondo del océano

En esta sección presentamos otro ejemplo sorprendente: el fondo del océano. El lugar más profundo del océano que se ha medido, se encuentra cerca de las islas Marianas y es de 11.000 metros.[2]

Imaginemos que a esta profundidad se encuentra un revólver y que su carga no se ha humedecido. Por cualquier circunstancia se aprieta el gatillo y se inflama la pólvora. ¿Sale la bala o no sale?

He aquí la descripción del revólver, indispensable para poder resolver este problema: longitud del tubo, 22 cm.; velocidad de la bala en el instante en que sale del tubo, 270 metros por segundo; calibre (diámetro del cañón), 7 mm.; peso de la bala, 7 gramos.

Entonces ¿puede dispararse este revólver en el fondo del mar o no?

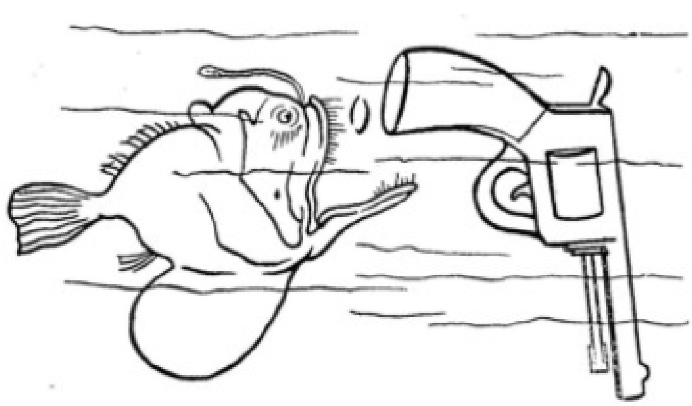


Fig. 11. ¿Puede dispararse una pistola en el fondo del océano?

El asunto consiste en resolver el problema: ¿cuál de las dos presiones ejercidas sobre la bala es más fuerte, la presión interna debida a los gases de la pólvora o la presión externa ejercida por el agua del océano?

Esta última se puede calcular del siguiente modo, sin incurrir en errores: cada 10 metros de una columna de agua producen la fuerza de una atmósfera, es decir 1 kilogramo por centímetro cuadrado. De aquí resulta que una columna de agua de

[2] La *fosa de las Marianas* es la más profunda fosa marina conocida y el lugar más profundo de la corteza terrestre. Se localiza en el fondo del Pacífico noroccidental, al sureste de las islas Marianas, cerca de Guam.
El 23 de enero de 1960, que se descendió por primera y única vez, á 11.034 metros, usando un batiscafo llamado Trieste invención de Auguste Piccard y capitaneado por Jacques Piccard, hijo del primero. Se evitaban así los efectos de la gran presión existente a tales profundidades.
La fosa tiene una longitud de 2.550 km y una anchura media de 70 kilómetros. La presión en el fondo de la fosa es de 108,6 MPa (unas 1072 atm). *(N. del E.)*

11.000 metros, ejerce una presión de 1.100 atmósferas, o sea, más de una tonelada por centímetro cuadrado.

Determinemos ahora la presión de los gases de la pólvora. Ante todo, la presión debida a la fuerza necesaria para empujar la bala que se hay que mover. Para esto calculamos la aceleración media del movimiento de la bala en el tubo (tomamos este movimiento como la aceleración media). Así hallamos en la tabla la relación:

$$v^2 = 2aS$$

en la cual v es la velocidad de la bala en el borde del cañón, a es la aceleración requerida y S es el espacio recorrido por la bala bajo la presión inmediata de los gases, es decir, el largo del tubo. Si decimos que v = 270 metros por segundo = 27.000 centímetros por segundo y que S = 22 cm, tenemos

$$27.000^2 = 2a \times 22$$

la aceleración a = 16.500.000 centímetros/segundo^2 = 165 kilómetros/segundo^2.

No debe sorprendernos la enorme aceleración (media) = 165 kilómetros/segundo^2; pues la bala recorre el camino del cañón del revólver en un intervalo mínimo de tiempo, que también se puede calcular. El cálculo se efectúa con ayuda de la fórmula $v = at$

$$27.000 = 16.500.000 \times t$$

según la cual, el tiempo

$$t = 27/16.500 = 1/600 \text{ segundos}$$

Vemos que en una 600 parte de un segundo, la velocidad de una bala debe pasar de cero a unos 270 metros/segundo. Queda claro que en un segundo el aumento de la velocidad es enorme.

Volvamos ahora al cálculo de la presión. Conociendo la aceleración de la bala (de 7 gramos de masa) nos resulta fácil calcular las fuerzas que actúan sobre ella, tomando la fórmula *f=ma*.

$$7 \times 16.500.000 = 115.500.000 \text{ dinas.}$$

Un kilogramo de pólvora equivale a un millón de dinas (una dina es aproximadamente equivalente a un miligramo); es decir sobre la bala actúa una fuerza de 115 kilogramos.

Para calcular la presión en kilogramos sobre un centímetro cuadrado, falta saber sobre qué área se aplicará esta fuerza. El área es igual a la sección transversal del cañón del revólver (el diámetro del cañón es de 7 mm. = 0,7 cm.)

$$1/4 \times 3{,}14 \times 0{,}7^2 = 0{,}38 \text{ cm}^2$$

Es decir, que sobre cada centímetro cuadrado obra una presión de 115 / 0,38, cerca de 300 kilogramos.

Y así la bala, en el momento de efectuar el disparo, alcanza una presión de 300 atmósferas contra una presión del agua del océano que pesa miles de atmósferas. De este resultado se deduce que la bala no se mueve de su lugar. La pólvora se enciende pero la bala no sale disparada. La bala del revólver que en el aire, á 35 pasos de distancia, traspasa fácilmente una tabla de 4 á 5 pulgadas, se muestra "impotente" frente al agua.

6. Mover al globo terrestre

El "sentido común" lleva a pensar a muchas personas, incluso las que conocen algo de mecánica, que con una pequeña fuerza no se puede mover un cuerpo libre, si tiene una masa enorme. La mecánica enseña una cosa completamente diferente: cualquier fuerza por insignificante que sea, puede poner en movimiento cualquier cuerpo libre, sin importar su peso ni su tamaño.

Más de una vez hemos aplicado la fórmula que expresa este concepto:

$$f = ma$$

de donde

$$a = f/m$$

Esta última fórmula nos dice que la aceleración *a* solo puede ser igual a cero, cuando la fuerza *f* es igual a cero. Esto quiere decir que para poner en movimiento cualquier cuerpo libre, basta aplicarle una fuerza cualquiera.

Debido a las condiciones que nos rodean, no siempre vemos claramente estas leyes. Esto se debe a que se presenta el rozamiento, el cual se opone al movimiento. En otras palabras, a menudo observamos cuerpos libres aparentemente, sin embargo la mayoría de los cuerpos que observamos no tiene movimiento libre.

Para poder poner en movimiento a un cuerpo sometido al rozamiento, hay que aplicar una fuerza mayor a la de dicho rozamiento. Si un armario de roble que se encuentra encima de un piso de roble seco, solo podemos moverlo con las manos si aplicamos una fuerza no menor a una tercera parte del peso del armario, porque la fuerza del rozamiento, roble sobre roble (enteramente seco) representa un 34% del peso del cuerpo. Pero si no existiera ningún roce, un niño sería capaz de mover un armario pesado, con solo tocarlo con el dedo.

Entre los pocos cuerpos que son auténticamente libres en la naturaleza, es decir, que se mueven sin estar expuestos al roce ni a la reacción del medio, se cuentan los cuerpos celestes: el Sol, la Luna, los planetas, y entre ellos también nuestra Tierra. ¿Quiere decir esto que el hombre puede mover de su lugar el globo terrestre con su fuerza muscular?

Sin duda alguna, si empujaras el globo terrestre ¡podrías ponerle en movimiento!

Pero queda un problema por resolver ¿cuál será la velocidad de este movimiento? Sabemos que la aceleración que adquiere el cuerpo, bajo la acción de fuerzas determinadas, es tantas veces menor, cuantas veces es mayor la masa del cuerpo. Si podemos acelerar con la fuerza de nuestras manos una bola de madera, de croquet, algunas decenas de metros por segundo, entonces podremos empujar al globo terrestre, cuya masa es mucho mayor que dicha pelota, con una aceleración inmensamente menor.

Decimos "inmensamente menor", sin importar su significado, en sentido literario. Se puede medir la masa del globo terrestre, y por consiguiente, también se puede calcular su aceleración en determinadas condiciones.

Procedemos así:

Suponemos que el hombre empuja al globo terrestre, con una fuerza de 10 kilogramos, es decir aproximadamente 10.000.000 dinas. Arriesgamos a enredarnos en cálculos superficiales, de no emplear una notación abreviada para los números grandes: 10.000.000 = 10^7. La masa del globo terrestre es igual a 6×10^{27} gramos. Por esto, la aceleración será:

$$a = \frac{f}{m} = \frac{10^7}{6 \text{ x } 10^{27}} = \frac{1}{6 \text{ x } 10^{20}} \frac{cms}{seg^2}$$

Este valor corresponde a la aceleración que adquiere el globo terrestre. ¿Cuánto se desplazará el planeta con una aceleración tan baja? Depende de la continuidad del movimiento. Y no es necesario realizar ningún cálculo para comprender que en una hora o en un día el desplazamiento es casi nulo. Sin embargo, si tomamos intervalos grandes, por ejemplo, en un año, que abarca 32 millones de segundos (32×10^6), entonces el espacio *S*, que recorre la Tierra en *t* segundos, con una aceleración *a*, es igual a (véase la tabla de utilidad en mecánica):

$$aS = \frac{v^2}{2}$$

$$S = \frac{v^2}{2a}$$

$$S = \frac{(at)^2}{2a}$$

$$S = \frac{at^2}{2}$$

En el caso dado:

$$S = \frac{1}{6 \text{ x } 10^{20}} \text{ x } \frac{\left(32 \text{ x } 10^6\right)^2}{2} = \frac{1}{12 \text{ x } 10^5} \text{ centímetros}$$

El desplazamiento es igual a una fracción de una millonésima de centímetro.

No se puede observar este desplazamiento, ni con el microscopio más potente que existe. Si tomamos un intervalo de tiempo mayor: por ejemplo, asumiendo que un hombre empuja el globo terrestre durante toda su vida, es decir, durante unos 70 años, entonces el desplazamiento aumentará en 70^2 veces, es decir, en números redondos, 5.000 veces y será igual a

$$\frac{5 \text{ x } 10^3}{12 \text{ x } 10^5} \text{ centímetros} = 0{,}04 \text{ milímetros}$$

Valor que equivale aproximadamente al grosor de un cabello humano. El resultado es sorprendente: con su fuerza muscular, un hombre puede mover al globo terrestre, durante toda su vida, una distancia igual al grosor de un pelo. ¿Qué esperabas?, ¡es una hazaña considerable para un ser tan pequeño como el hombre!

Lo más sorprendente es que nuestros cálculos no tienen nada de fantástico. ¡Efectivamente, nosotros movemos el globo terrestre con nuestra fuerza muscular! Igual fenómeno ocurre, por ejemplo, cuando saltamos sobre la Tierra, pues presionamos la Tierra con nuestros pies aplastándola ligeramente, bajo la acción de esta fuerza.

Con cada paso que damos ejecutamos una auténtica proeza, porque con cada pisada empujamos al planeta. Cada segundo forzamos al globo terrestre a realizar continuos movimientos microscópicos, variando así los movimientos astronómicos, inherentes a nuestro planeta.[3]

7. El falso camino para un invento

En busca de nuevas posibilidades técnicas, los inventores deben ajustar sus ideas a las leyes estrictas de la mecánica, de lo contrario, emprenden el camino hacia fantasías irrealizables. No conviene pensar que el único principio general, que no debe violar el inventor de un proyecto, es la ley de la conservación de la energía.

Existe también otro factor a tener en cuenta, cuya omisión confunde con bastante frecuencia a los inventores, impidiéndoles desarrollar sus proyectos a cabalidad. Se trata de la ley del movimiento del centro de gravedad. Estudiando proyectos en desarrollo, de nuevas máquinas voladoras, estoy altamente convencido de que esta ley es poco conocida en los grandes círculos.

La mencionada ley afirma que no debe confundirse el movimiento del centro de gravedad de un cuerpo (o de un sistema de cuerpos) con las fuerzas internas que actúan sobre él.

Si explota una bomba que se lanza desde un avión, sus fragmentos conservan el centro general de gravedad de la bomba, hasta que llegan a tierra. Con frecuencia resulta imposible que una fuerza interna varíe el centro de gravedad de un cuerpo que estuvo inicialmente en reposo (inmóvil).

El siguiente ejemplo muestra como se incrementa el error, cuando el inventor no tiene presentes estas leyes. Se trata de un proyecto para desarrollar una máquina voladora, totalmente nueva y original.

[3] Por lo tanto debe tenerse en cuenta que solo una parte de nuestra fuerza se relaciona con el movimiento de la Tierra, mientras que la parte restante afecta la forma del planeta.

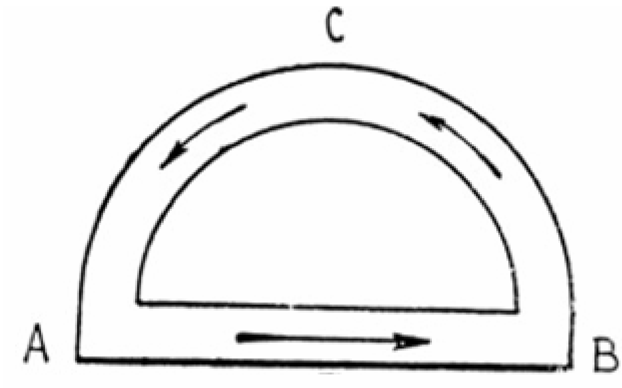


Figura 12. Proyecto de un nuevo modelo de una máquina voladora

Imaginemos, dice el inventor, un tubo cerrado (Fig. 12) compuesto por dos partes: una parte recta, horizontal, *AB*, y otra arqueada *ACB*, ubicada sobre la primera. En el interior del tubo hay una sustancia líquida, que fluye continuamente en un sentido (se mantiene el flujo en movimiento, mediante un tornillo giratorio situado dentro del tubo). La corriente del líquido en la parte arqueada *ABC* del tubo está acompañada por la presión centrífuga sobre las paredes del mismo. Si se aplica una fuerza *P* (Fig. 13), en sentido ascendente, fuerza a la que no se opone ninguna otra, el movimiento del líquido en el trayecto recto *AB* no estará acompañado por presiones centrífugas. El inventor concluye que cuando la corriente alcanza suficiente velocidad, la fuerza *P* debe arrastrar la máquina hacia arriba.

¿Es correcto el razonamiento del inventor? Aún sin tener conocimientos de mecánica, se puede afirmar que el aparato no se moverá de su lugar. Como aquí actúan fuerzas internas, estas no pueden desplazar el centro de gravedad del sistema (es decir, el tubo junto con el líquido que le llena y el mecanismo que hace correr dicho líquido). Por lo tanto, la máquina no puede lograr un movimiento ascendente. En los cálculos del inventor se presentan errores debidos a un descuido crucial.

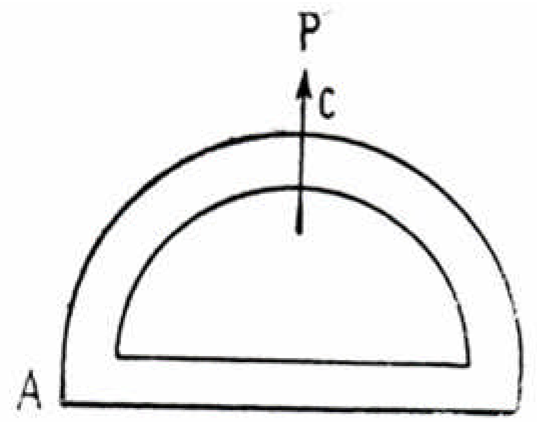


Figura 13. La fuerza P debe arrastrar la máquina voladora hacia arriba.

Fácilmente se demuestra en qué consiste este error. El autor del proyecto no tuvo en cuenta que no solo se presenta la presión centrífuga en la parte arqueada, *ABC*, por donde fluye el líquido, sino también entre los puntos *AB* por donde pasa la corriente (Fig. 14). El trayecto arqueado es corto, y la curva es muy cerrada (el radio de la curva es muy pequeño). Pero se sabe que cuanto más pronunciado es el arco (cuando la curva es menor), tanto mayor es el efecto centrífugo. Como consecuencia de esto, sobre la trayectoria del líquido deben actuar dos fuerzas más, *Q* y *R*, que se orientan hacia afuera, estas fuerzas actúan hacia abajo y son iguales a la fuerza hacia arriba, *P*, fuerza que contrarrestan, anulando su efecto sobre el artefacto. El inventor no tuvo en cuenta estas fuerzas. Pero aunque no las asociara, el inventor debía comprender el fracaso de su proyecto, si conociera la ley del movimiento del centro de gravedad.

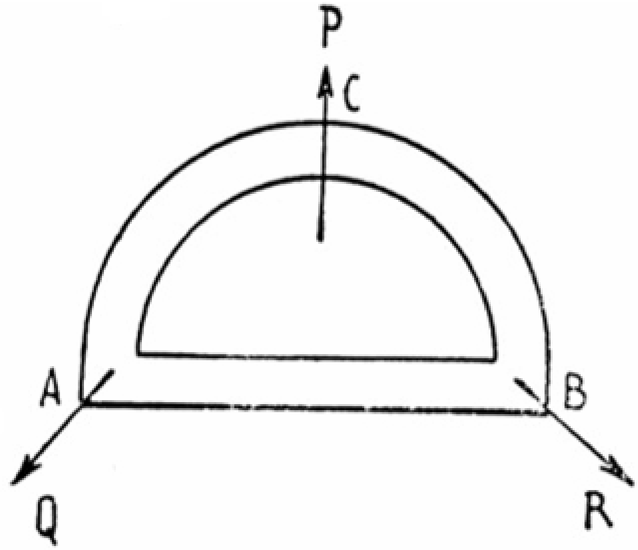


Figura 14. ¿Por qué el aparato no se eleva?

Hace cuatro siglos, el gran Leonardo da Vinci, escribió precisamente que las leyes de la mecánica "deben retener las riendas de los ingenieros e inventores, para que ellos no se prometan ni prometan a los demás, realizar cosas imposibles de lograr".

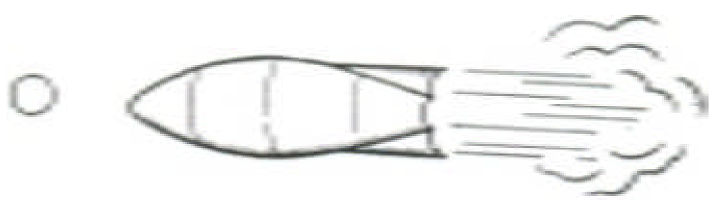
8. ¿Dónde está el centro de gravedad del cohete?

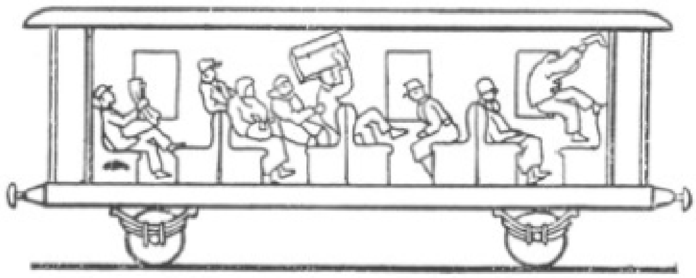
Se puede afirmar que el hijo más joven y prometedor de la técnica moderna, el cohete, niega la ley del movimiento del centro de gravedad. Los navegantes del espacio quisieran encontrar un cohete que pudiera volar hasta la Luna, solo bajo la acción de fuerzas internas. Pero está claro que el cohete lleva consigo su centro de gravedad al llegar a la Luna. ¿Qué sucede en este caso con nuestra ley? El centro de gravedad del cohete hasta el momento de su lanzamiento se hallaba en la Tierra y ahora se encuentra en la Luna. ¡No puede haber una alteración más clara de esta ley!

¿Qué se puede objetar contra este cambio? Que se basa en un error. Como hay gases que se escapan del cohete al partir de la superficie de Tierra, queda claro que el cohete no traslada a la Luna su centro de gravedad. Solo una parte del cohete vuela a la Luna; atrás quedan los productos inflamables, que se mueven en dirección opuesta, por esto el centro de gravedad de todo el sistema permanece en el lugar en el que se encontraba antes del lanzamiento.

Ahora centremos nuestra atención en el hecho de que los gases expelidos no se desplazan libremente, sino que chocan contra la tierra. Lo dicho para el cohete se puede aplicar al globo terrestre y a la conservación del enorme sistema del cohete-Tierra. Debido al choque de las corrientes de los gases contra la Tierra (o contra su atmósfera), a veces se desplaza nuestro planeta, y su centro de gravedad se mueve hacia el lado opuesto al movimiento. Pero la masa del globo terrestre es tan grande en comparación con la masa del cohete, que basta un cambio imperceptible para restablecer la posición de equilibrio del centro de gravedad del sistema cohete-Tierra, que es la condición necesaria para que el cohete se dirija hacia la Luna. El desplazamiento del cohete hacia la Luna es tanto más rápido, cuanto mayor es la masa de la Tierra en comparación con la masa del cohete (es decir, centenares de miles de veces).

Vemos que la ley del centro de gravedad conserva siempre su validez, aún en situaciones poco habituales.





CAPÍTULO 3
LA GRAVEDAD

Contenido:

1. El ejemplo de la plomada y el péndulo

La plomada y el péndulo son sin duda los aparatos más simples de todos cuantos utiliza la ciencia. Es asombroso que instrumentos tan primitivos hayan adquirido una fama casi legendaria. Gracias a ellos el hombre logró penetrar con el pensamiento en el seno de la tierra y ha podido saber lo que acontece a decenas de kilómetros bajo nuestros pies.

Apreciamos plenamente esta proeza de la ciencia si recordamos que los pozos profundos de las minas no alcanzan más de 3½ kilómetros; es decir, que están lejos de alcanzar aquellas profundidades de la Tierra de las que tenemos información utilizando la plomada y el péndulo.

El principio mecánico, en el que se basa la aplicación, determina el cálculo en cualquier punto. La variación en la distribución de la masa terrestre cerca de la superficie de la Tierra o en las profundidades de ésta, modifica el supuesto teórico. La proximidad de las montañas, por ejemplo, desvía la plomada hacia ellas y tanto más notable es la desviación cuanto más cerca está la montaña o cuanto mayor es su masa. En las proximidades del observatorio de Simferópol (Crimea),[1] la plomada experimenta una notable inclinación por la proximidad de las montañas de Crimea; el ángulo de inclinación alcanza medio minuto. La plomada se desvía aún más en las montañas del Cáucaso;[2] en Transcaucasia la desviación es de 37 segundos de arco y en Batum[3] es de 39 segundos. Por el contrario, el vacío en las llanuras terrestres aleja la plomada del piso: la plomada se desvía hacia el lado opuesto a las masas que la rodean. (En estas planicies parece que el empuje es igual a la atracción que ejerce la masa de la materia sobre la plomada, cuando ésta cae dentro de una cavidad). El empuje que se ejerce sobre la plomada se debe al vacío, y a la falta de aglomeración de las masas de poca solidez que abundan en la espesura de los bosques.

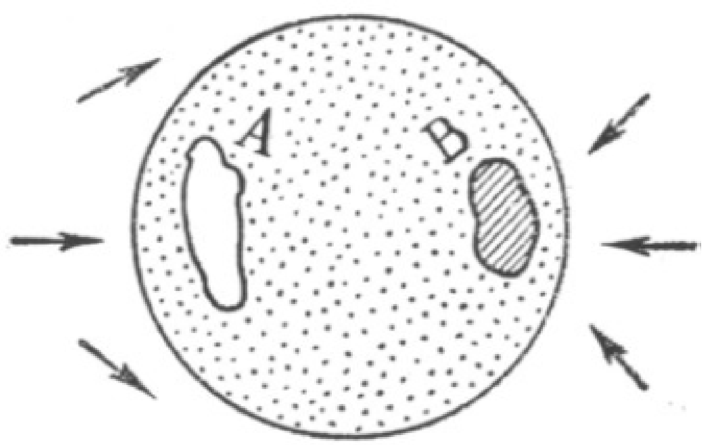


Fig. 15. El vacío A y el macizo B, según Klossovsky, son los que desvían las plomadas.

[1] Simferópol -literalmente significa: *mezquita blanca*-. Ciudad de Ucrania, capital de la República Autónoma de Crimen -única república autónoma de Ucrania-, situada al sur del país, en la costa norte del Mar Negro. Se encuentra a orillas del río Salgir -el río más grande de Crimen-. *(N. del E.)*
[2] Montañas del Cáucaso. Gran cordillera localizada entre el mar Negro y el mar Caspio, en la región del Cáucaso, entre las cuencas del río Kubán y del río Terek, al norte de Anatolia, y el río Irán, al sur. Se consideran el límite suroeste de Europa. *(N. del E.)*
[3] Batum o Batumi. Ciudad de Georgia, capital de la república autónoma de Adjaria. *(N. del E.)*

Por esto en Moscú, alejada de toda montaña, la plomada se desvía hasta 10 segundos de arco hacia el norte. Como veremos, la plomada puede servir como instrumento de medida con el cual se puede medir la estructura y composición del interior de la Tierra. El péndulo es otro instrumento de medida, aún más sensible. Este instrumento posee la siguiente propiedad: si su balanceo no pasa de unos pocos grados, la duración del balanceo no depende del grado de la oscilación, por lo que no existe diferencia entre un gran balanceo y un pequeño balanceo de dicho péndulo. La prolongación de la oscilación depende de otros factores: de la longitud del péndulo y de la aceleración de gravedad (g) en un determinado lugar del globo terrestre. La fórmula que relaciona la duración t, de una oscilación completa, (ida y vuelta), con la longitud l, del péndulo y con la aceleración g, de la gravedad, es la siguiente

$$t = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$$

Si se tiene la longitud l del péndulo en [m], conviene expresar la aceleración de la gravedad, g, en [m/seg^2].

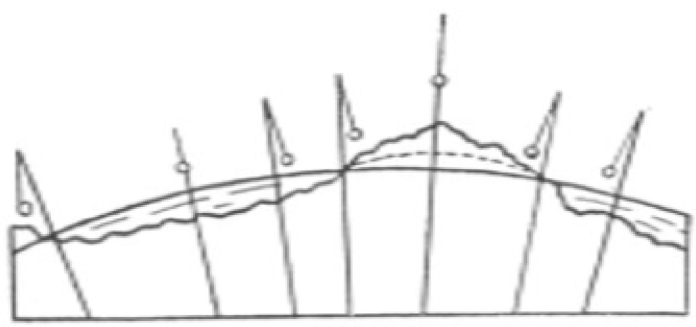


Fig. 16. Perfil de la superficie de la tierra y orientación de la plomada según A. B. Klossovsky

Cuando para calcular el espesor de la Tierra se emplea un péndulo "segundero", es decir, un péndulo que efectúa una oscilación por segundo (de un lado a otro, es decir, el movimiento de ida o de vuelta), la fórmula será:

$$\pi\sqrt{\frac{l}{g}}=1$$

$$l=\frac{g}{\pi^2}$$

Queda claro que cualquier cambio de la gravedad se refleja en la longitud de este péndulo; por esto se debe alargar o acortar la cuerda del mismo, para que oscile con exactitud, cada segundo.

Mediante este procedimiento, se logran medir variaciones en la fuerza de gravedad hasta de una diezmilésima (0,0001).

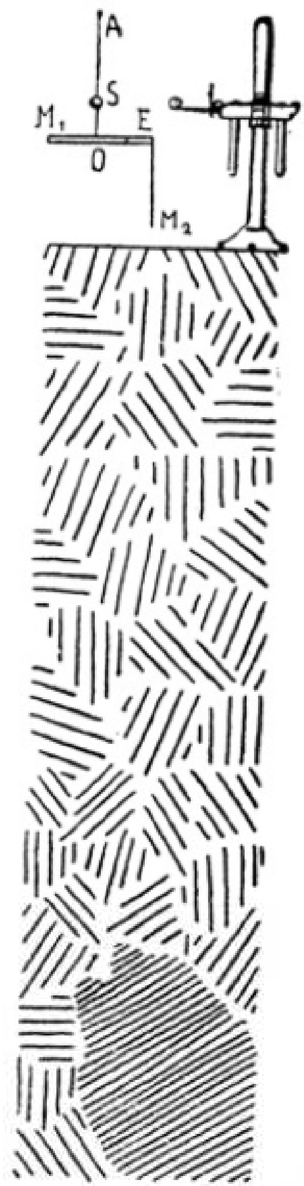


Fig. 17. Arriba, a la derecha, un variómetro; a la izquierda, el esquema de dicho instrumento

No voy a describir la técnica de medición con la plomada y el péndulo (es más complicada de lo que se pueda imaginar). Solo quiero indicar algunos resultados interesantes.

Parece que cerca de las costas del océano, la plomada siempre se debe desviar hacia los macizos montañosos. La experiencia no confirma esta afirmación. Con el péndulo se comprueba que la fuerza de gravedad es mayor en el océano y en las islas, que cerca de las costas, y que a su vez, la fuerza de gravedad es mayor junto a las costas que lejos de ellas, en el interior del continente.

¿Qué indica esto? Indica sin duda, que en la Tierra, la capa continental está formada de material más ligero que la del fondo de los océanos. Estos resultados constituyen una fuente de valiosa información para los geólogos, quienes sacan conclusiones acerca de las capas de las cuales se compone la corteza de nuestro planeta.

Este procedimiento resultó de gran valor en la investigación que permitió aclarar las causas de la "anomalía magnética de Kursk".[4] Dedicamos algunas líneas al resumen que hizo sobre esta anomalía uno de sus investigadores.[5]

> *"Con absoluta precisión se puede afirmar la existencia de grandes masas de atracción bajo la superficie de la tierra, porque el límite de estas masas hacia el lado occidental... se puede establecer con absoluta exactitud. También es de suponer que estas masas se extienden estas masas, principalmente hacia el Oriente; porque la pendiente oriental es más moderada que la occidental".*

Es bien conocida la gran importancia industrial que han tenido aquellos yacimientos de hierro, que fueron descubiertos en la región de la anomalía de Kursk.[6] Las reservas de las minas de hierro cuentan aquí por decenas de miles de toneladas que constituyen casi la mitad de todas las reservas mundiales. También se hallaron

---

[4] Kursk. Ciudad ubicada en los confines occidentales de Rusia, cercana a la frontera con Ucrania. Es el centro administrativo del Óblast de Kursk. Urbe ferroviaria, industrial y de servicios, en ella se encuentra una central nuclear.

Kursk se encuentra ubicada en la baja meseta de la Rusia Central, a unos 530 km. al SO de Moscú, en la ruta que une dicha capital con Járkov y Crimea, en Ucrania. Kursk es vecina de las ciudades rusas de Orel (al N) y Bélgorod (al S). La ciudad se encuentra emplazada sobre dos bajas colinas, en la confluencia de los ríos Kur y Seym. Se halla rodeada de áreas boscosas. *(N. del E.)*

[5] La investigación en la región de Kursk sobre la anomalía no se efectuó con la plomada sino con una balanza especialmente construida (el llamado "variómetro"). El hilo del aparato se encuentra bajo el efecto de la atracción de las masas subterráneas; ¡este aparato verifica las medidas con extraordinaria exactitud, alcanzando la billonésima parte de un gramo (10^{-12})!

Este variómetro "percibe" la atracción de grandes montañas a una distancia de 300 kilómetros. He aquí una breve descripción del aparato (de un artículo del profesor P. M. Nikiforov, sobre la anomalía de Kursk): "La parte principal del aparato consiste en una balanza rígida, cuyo diagrama esquemático se muestra en la figura 17.

El balancín M_1E de un tubo delgado de aluminio, tiene aproximadamente unos 70 centímetros de longitud; en uno de los extremos del balancín está sujeto un peso de oro de forma cilíndrica (30 gramos) y en el otro está suspendido de un alambre, EM_2, otro peso de oro M_2 (de 30 gramos).

El balancín está suspendido de la balanza por un delgado hilo de platino-iridio *OA*, de 60 á 70 centímetros de longitud. Para proteger la balanza de las corrientes de aire, está envuelta en una cubierta de una malla triple de alambre. El aparato lleva dos pares de balanzas arqueadas, que giran en sentidos opuestos (180°), una en relación a la otra. *S* es un espejo plano.

[6] La *Anomalía Magnética de Kursk*, *KMA*, fue descubierta en 1.733 por el astrónomo ruso Pyotr Inokhodtsev. En 1.883, Nikolay Dimitriyevich Pilchikov realizó 71 observaciones de la anomalía, poniendo de manifiesto la presencia de hierro. Entre en 1.920 y 1.925, Iván Gubkin realizó investigaciones relativas a las posibilidades económicas de la zona, basadas en las posibilidades de hallar petróleo. En 1.931 se descubrieron varias riquezas minerales en la región de la anomalía, principalmente magnetita y cuarcita. *(N. del E.)*

algunos resultados por fuera de toda norma, referentes a la fuerza de gravedad, en la citada anomalía, en los declives orientales de los Urales, (según investigaciones realizadas en 1.930, por los astrónomos de Leningrado).

"Cerca de Salatusta tenemos un valor máximo de la fuerza de gravedad, que corresponde al ascenso del macizo cristalino de las cordilleras de los Urales".

"Al este de Kosirev existe un segundo valor máximo que caracteriza la aproximación a la superficie continental, de antiguas cordilleras, hoy sumergidas".

"Un tercer máximo, al este de Mischkino, da una nueva indicación sobre la aproximación a la superficie terrestre, de capas antiguas".

Y finalmente, un cuarto máximo, al oeste de Petropavlovsk, ocasionado por la aproximación de capas más pesadas". (Boris Vasilyevich Numerov).[7]

Tenemos ante nosotros dos ejemplos, entre los muchos que hay, que demuestran que la física crea las bases para el desarrollo científico y la aplicación práctica, en otros terrenos bastante alejados de ella.

2. El péndulo en el agua

Imaginemos que el péndulo de un reloj de pared se balancea en el agua. Su peso en el extremo de la cuerda tiene una forma "corriente" que hace descender casi a cero la resistencia del agua frente a su movimiento. La oscilación de este péndulo ¿será mayor o menor dentro del agua que fuera de ella?

En otras palabras: ¿el péndulo oscila con mayor velocidad en el agua que en el aire u oscila de un modo más lento?

[7] Boris Vasílievich Numerov (1.891-1.941). Astrónomo y geofísico ruso. Creó varios instrumentos astronómicos y mineralógicos. También creó varios algoritmos y métodos numéricos que llevan su nombre. Algunos de ellos se utilizan para resolver ecuaciones diferenciales ordinarias. En razón de estos logros, en 1.970 la Unión Astronómica Internacional decidió en su honor llamarle «Numerov» a un astroblema ubicado en el lado oscuro de la Luna. El asteroide «1206 Numerowia» también lleva su nombre. *(N. del E.)*

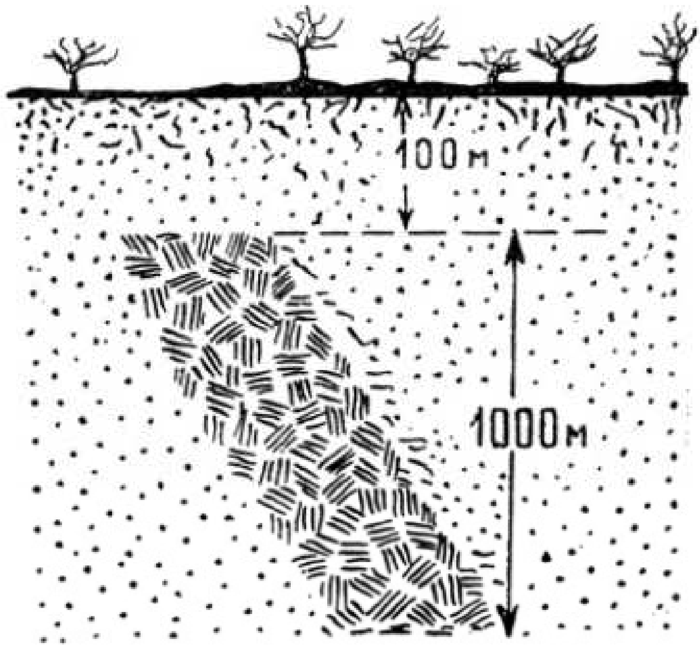


Figura 18. La causa de la anomalía de Kursk: á 100 metros de profundidad se encuentra una veta de hierro que llega hasta unos 1.000 metros más abajo

Como el péndulo oscila en un medio sin resistencia, no existe ninguna fuerza que le cambie su velocidad de oscilación. Sin embargo, la experiencia enseña, que en dichas condiciones, el péndulo parece oscilar más lentamente.

Este fenómeno, enigmático a primera vista, se explica debido a que el agua tiende a impulsar hacia afuera todos los cuerpos sumergidos en ella. El agua también disminuye el peso del péndulo, sin cambiar su masa.

Esto quiere decir que el péndulo se encuentra en el agua, como si se hubiera trasladado a otro planeta, donde la aceleración de la gravedad es más débil. De la fórmula explicada en capítulos anteriores,

$$t = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$$

se deduce que al presentarse una disminución de la aceleración de gravedad (*g*), se aumenta el tiempo de oscilación (*t*); por lo tanto, el péndulo tendrá una oscilación más lenta.

3. Sobre un plano inclinado

Un vaso con agua se encuentra sobre un plano inclinado (Fig. 19). Mientras esté en reposo, el nivel *AB* del agua que hay dentro del vaso, permanecerá horizontal. Pero después de comience a deslizarse el vaso sobre el plano inclinado liso (sin fricción), *CD*, ¿permanecerá horizontal el nivel del agua en el vaso, mientras que este se desliza por el plano?

La experiencia indica que cuando un vaso con agua se mueve sin rozamiento, sobre un plano inclinado, el nivel del agua queda paralelo a la inclinación del plano. Veamos por qué:

El peso *P* de cada partícula (Fig. 20) puede descomponerse en la dirección de las fuerzas: *Q* y *R*.

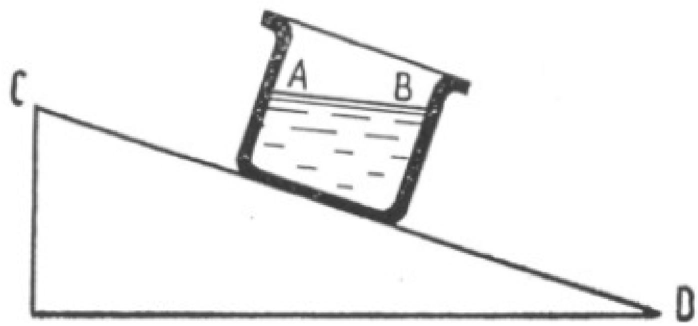


Fig. 19. Una vasija con agua se desliza por un plano inclinado. ¿Cómo queda la superficie del agua?

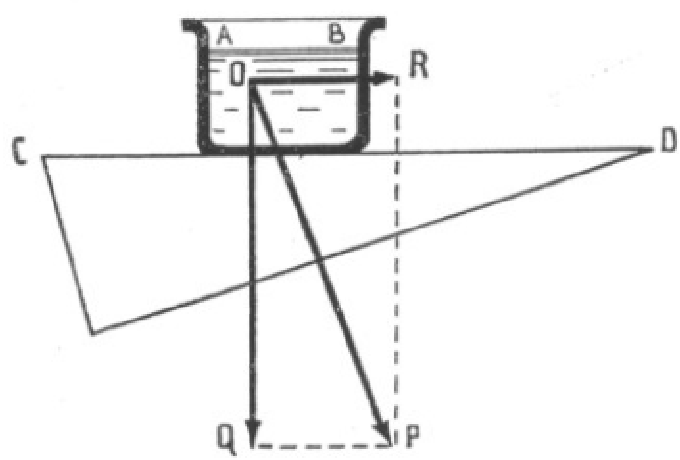


Figura 20. Solución al problema de la figura 19.

La fuerza *P* arrastra las partículas del agua y del vaso que se mueven a lo largo del plano inclinado *CD*; estas partículas de agua ejercen una presión sobre las paredes del vaso en movimiento, igual a la que ejercen sobre él cuando está en reposo (debido a que se presenta un movimiento uniformemente acelerado). La fuerza *Q*, comprime las partículas del agua hasta el fondo del vaso. La acción de la fuerza *Q* sobre el agua es igual a la acción ejercida por la fuerza de gravedad, sobre las partículas de cualquier líquido en estado de reposo: el nivel del agua se inclina perpendicularmente a la dirección de la fuerza *Q*, es decir, en dirección paralela a la línea del plano inclinado.

Pero ¿cuál es la posición del nivel del agua en una vasija redonda que se desliza hacia abajo sobre el plano inclinado, con fricción y con velocidad uniforme?

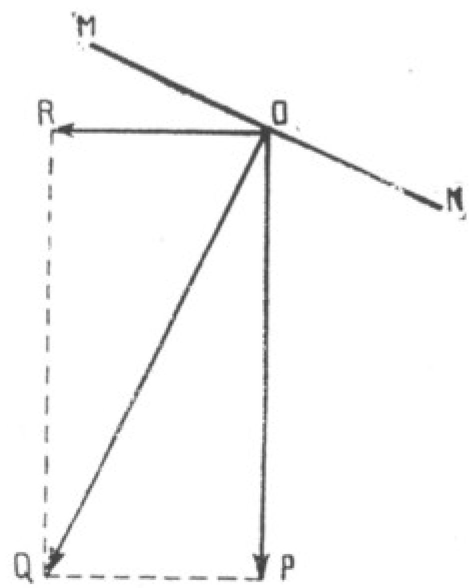


Figura 21. ¿Qué fuerzas actúan sobre los objetos en un vapor que se pone en movimiento? (Dirección del movimiento)

Se puede observar que en dicha vasija el nivel del agua no se inclina, sino que permanece horizontal.

Se deduce este resultado del hecho de que, según las leyes mecánicas, el movimiento uniforme no puede provocar ningún cambio en el estado de reposo en que se encuentran los cuerpos (principio clásico de la relatividad).

¿También es válido este resultado para todo lo expuesto anteriormente? Ciertamente sí, incluso cuando se presenta un movimiento uniformemente acelerado del vaso sobre el plano inclinado, las partículas de la pared del vaso no reciben ninguna aceleración; las partículas del líquido que se encuentra dentro del vaso, están bajo la acción de la fuerza *R*, y, por lo tanto, son presionadas por la fuerza *R*, contra la pared del vaso. De acá se deduce que cada partícula de agua se encuentra bajo la acción de dos fuerzas: las fuerzas *R* y *Q*, que son equivalentes al peso *P*, el cual va en dirección vertical. Por esta razón el nivel de agua debe permanecer horizontal. Solo se inclina el nivel del agua durante un pequeño instante de tiempo, al comenzar a moverse el vaso, hasta lograr la rapidez establecida.[8]

4. ¿Cuándo una línea horizontal no es horizontal?

Si en el vaso o en la vasija que se desliza hacia abajo sin roce alguno, en lugar del agua se encuentra un hombre, se presenta una situación muy extraña. El cuerpo del hombre es lanzado contra la pared inclinada del vaso de la misma forma que sería lanzado, si dicho hombre estuviera en reposo, contra una pared horizontal (sólo que con menos fuerza). Es decir, que para este hombre, el plano inclinado de la pared del vaso, parece estar completamente horizontal. Por esta razón, la dirección que percibía horizontal al iniciar su desplazamiento, se convierte para el hombre en mención, en la dirección de un plano inclinado. Todo se presenta ante él de aspecto muy extraño: las casas, y todas las cosas a su alrededor parecen estar inclinadas, percibe inclinada la superficie del estanque, todo el paisaje parece estar "al revés". Si este "pasajero" sorprendido no cree lo que ve y toma una balanza para verificar el nivel, el instrumento le indicará que el nivel es horizontal. En otras palabras: para este hombre, la dirección horizontal no es horizontal, en el sentido habitual de la palabra.

Hay que anotar que cada vez que desconocemos la inclinación de nuestro propio cuerpo en relación a la posición perpendicular, la atribuimos a la pendiente de la

[8] Hay que recordar que el cuerpo no puede alcanzar instantáneamente una velocidad uniforme; en el tiempo durante el cual pasa el cuerpo del estado de reposo a una velocidad uniforme, dicho cuerpo atraviesa por un estado de aceleración; estado que puede ser de corta duración.

naturaleza que nos rodea. Los borrachos consideran que todo se mueve en círculo alrededor de ellos. Recordemos que Necrasov dice en una de sus obras:

> *"Al campesino le parecía que había subido a una colina y que todo el pueblo se balanceaba, la iglesia vieja con sus altos campanarios temblaba, y los dos campanarios se acercaban mutuamente".*

El campo horizontal también puede perder para el hombre su posición horizontal cuando se desplace, no por una pendiente, sino por un camino horizontal. Así sucede, por ejemplo, cuando el tren entra o sale de las estaciones, y las partes del camino en las que los vagones corren más lenta o más rápidamente. He aquí descrita la sensación que experimenta un pasajero, observada por el físico francés, Ch. Guillaume:

> *"Cuando el tren comienza a disminuir su marcha, podemos percibir una extraña sensación: nos parece que el campo se inclina en la dirección del movimiento del tren; pensamos que marchamos hacia abajo cuando marchamos a lo largo del vagón en la dirección del movimiento del tren y que marchamos hacia arriba, cuando nos movemos en dirección opuesta al movimiento de éste. Pero cuando el tren se marcha de la estación, el campo siempre parece inclinarse hacia el lado opuesto a su movimiento".*
> *"Podemos reproducir el experimento",* sigue escribiendo el mismo autor, *"de manera que explique la aparente inclinación que de hecho sigue siendo una posición horizontal. Para esto, basta tener dentro del vagón un frasco con cualquier clase de líquido, por ejemplo, glicerina; en el momento en que acelera el tren, la superficie del líquido adopta una posición inclinada. Se habrá oído más de una vez que no es agradable estar sentado cerca de los depósitos de agua de los vagones, en época de lluvia. Cuando el tren está en marcha, el agua de los depósitos parece caer hacia adelante y cuando el tren parte de las estaciones, el agua parece caer hacia atrás. Esto se debe a que la superficie del agua sube hasta el borde opuesto a la dirección del movimiento"*.

Si queremos examinar las causas de estos extraños fenómenos, no debemos observarlos desde el punto de vista de un observador pasivo, en estado de reposo, que no se encuentra dentro del tren en marcha, sino desde el punto de vista de aquel observador que encontrándose en el interior del vagón, participa de la aceleración del movimiento y por consiguiente, como alguien que está en relación directa con todos los fenómenos observados a pesar que él se considere inmóvil.

Cuando el vagón se mueve aceleradamente y nos sentimos en estado de reposo, la presión de la pared trasera del vagón nos empuja hacia adelante (tratando de levantarnos), o nos empuja hacia atrás, tirándonos contra la pared (tratando de sentarnos), siempre con la misma fuerza. Nos encontramos entonces bajo la influencia de dos fuerzas: la fuerza *R*, en dirección contraria al movimiento del tren y la fuerza *P* que nos presiona contra el suelo. La fuerza *Q* se orienta en igual sentido que nosotros, representa la dirección que hubiésemos considerado perpendicular en estado de reposo. La dirección perpendicular, *MN*, es horizontal para nosotros. De aquí resulta que, en relación al movimiento del tren, la anterior dirección horizontal, *OR*, se transforma en la dirección opuesta (Fig. 22).

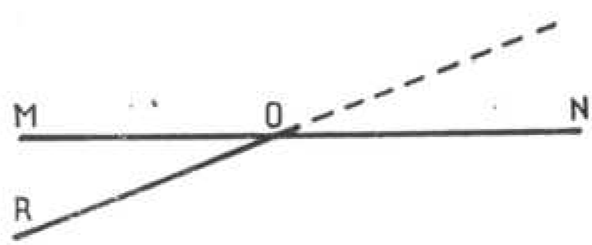


Figura 22. ¿Por qué parece inclinado el piso de un tren que se pone en movimiento?

¿Qué sucede en estas condiciones con los líquidos contenidos en los platos? Para esto hay que tener en cuenta que la nueva dirección "horizontal" no coincide con el nivel del líquido, sino que va en la dirección de la línea *MN* (Fig. 23). Esto se observa claramente en la figura en la que se indica la dirección del movimiento del vagón. Ahora se comprende por qué se sale el agua por el borde del plato (o por el borde del depósito de agua del tren).

Resulta fácil imaginar un cuadro con todos los fenómenos que ocurren en el vagón en el momento en que arranca el tren, si se tiene en cuenta que el vagón se inclina, tomando una posición completamente nueva respecto a su línea "horizontal" (véase la viñeta al principio de este capítulo). Así se comprende por qué razón la gente que se encuentra de pie en el vagón, se cae hacia atrás. Esto se debe a que los pasajeros que están de pie sobre el vagón, tienen sus piernas en movimiento, mientras que su tronco y su cabeza están todavía en estado de reposo.

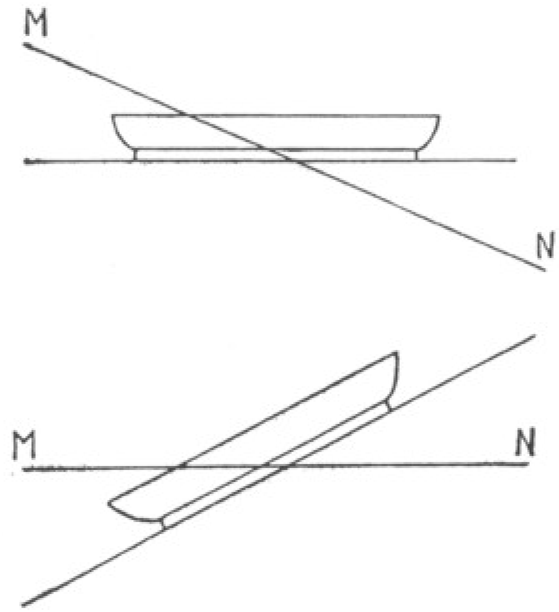


Figura 23. ¿Por qué se derraman los líquidos por un lado del plato, en un tren que se pone en marcha?

Galileo realizó una observación similar, como bien se aprecia en el siguiente fragmento, extraído de sus escritos:

> *"El vaso con agua se encuentra en movimiento variable, su velocidad cambia, aumentando y disminuyendo. ¿Cuáles serán las consecuencias de esta variación? El agua no se ve privada de movimiento dentro del vaso. Al disminuir la velocidad del vaso, el agua conserva la velocidad que traía y afluye hacia adelante, aglomerándose hacia dicho lado, como es de esperar. De igual manera, cuando aumenta la velocidad del vaso, el agua conserva su velocidad de desplazamiento, la que es más lenta que la velocidad a la que se mueve el vaso, y por lo tanto, afluye y se concentra en la parte de atrás"*.

Esta observación no es contraria a los fenómenos que hemos mencionado antes.

Para la ciencia, esta observación tiene igual validez que las descritas antes, que no sólo concuerdan con los hechos sino que también ofrecen la posibilidad de aplicarlas cuantitativamente.

Por tal razón, al explicar lo que ocurre con el vaso de agua, debemos optar por la interpretación expuesta al comienzo, es decir, la explicación según la cual, el piso bajo los pies del observador deja de ser horizontal. Este razonamiento permite apreciar el fenómeno de un modo cuantitativo, en lugar de explicarlo de forma trivial, algo que no debe hacerse. Así, por ejemplo, si la aceleración del tren al partir de la estación, es igual a 1 m/seg^2, entonces el ángulo *QOP* (Fig. 21), entre la dirección nueva y la vieja, se calcula fácilmente con ayuda del triángulo *QOP*, en el cual $QP \div OP = 1 \div 9{,}8 = 0{,}1$.

De forma aproximada se tiene que:

$$\mathrm{tg}\,[QOP] = 0{,}1;$$

$$\angle QOP = 6^{\circ}$$

Esto quiere decir que la plomada que se encuentre pendiendo del vagón, debe inclinarse 6 grados al partir el tren. El piso bajo los pies del observador se inclina instantáneamente 6 grados, y si el observador camina a lo largo del vagón, percibe la misma sensación que sentiría si marchara sobre un camino con una inclinación de 6 grados. El método ordinario para observar estos fenómenos no nos permite apreciar tales detalles.

Es posible que el lector pueda objetar que la discrepancia entre las dos interpretaciones se debe a que parten de dos conceptos diferentes:

La primera explicación toma como punto de partida del fenómeno, el hecho que el observador que se encuentra en reposo se halla fuera del vagón.

El segundo razonamiento parte del hecho que el observador participa en el proceso de la aceleración del movimiento.

5. La montaña magnética[9]

En California, cerca de la ciudad de Hollywood, conocido centro de la industria cinematográfica, hay una montaña de la cual los automovilistas locales (es decir, casi tres cuartas partes de toda la población) afirman, que tiene cualidades magnéticas. Se trata que en una corta sección el camino, de unos 60 metros, en la que se pueden observar en la base de esta montaña fenómenos muy extraños. Si un automóvil baja por la pendiente y el conductor apaga el motor, el auto rueda hacia atrás, es decir que el carro rueda pendiente arriba, tirado por la atracción magnética de la montaña.

Figura 24. La supuesta montaña mágica de California

Esta propiedad sorprendente de la montaña se considera bien fundamentada, porque dicho fenómeno se ha relacionado en tablas. Para comprobarlo se realizó una investigación detallada, de esta parte de la montaña.

[9] En la Tierra hay una serie de lugares en los que se produce un fenómeno misterioso. Se conocen con diversos nombres: *colinas antigravitatorias*, *colinas misteriosas*, *montañas magnéticas*, *colinas de ingravidez*, pero todos se refieren al mismo fenómeno.
La peculiaridad de estas colinas es que si se deja correr una corriente de agua o se coloca una esfera en el suelo, estas tienden a subir en lugar de bajar. Parece como si fuesen en sentido contrario al de la gravedad. Hay cientos de estas colinas misteriosas a lo largo del mundo.
La explicación científica identifica el fenómeno con una ilusión óptica. Así que, lo que parece una subida es realmente una ligera pendiente descendente encajada en una gran pendiente ascendente. La ilusión se debe a que el descenso es precedido o seguido de una gran pendiente en ascenso, que constituye para el observador una referencia engañosa, es decir, que la orografía del entorno favorece la percepción distorsionada de la pendiente.
Los defensores del efecto óptico dicen que estos lugares tienen una cosa en común, y es la ausencia de referencias de horizonte que impiden al observador la correcta definición de las pendientes de la colina, haciéndole creer que está bajando cuando en realidad está subiendo. *(N. del E.)*

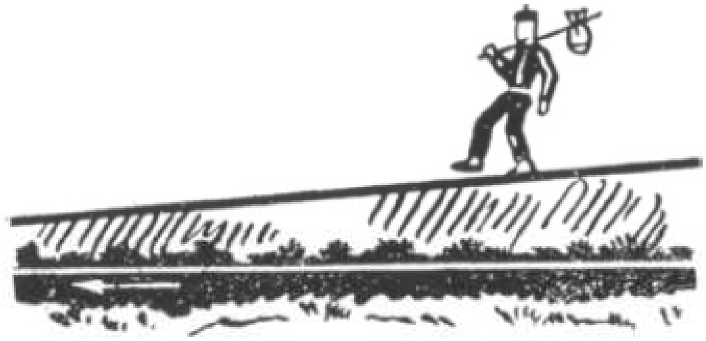


Figura 25. Inclinación imperceptible de un camino a lo largo de un río.

Se obtuvo un resultado inesperado: lo que todos habían considerado como un ascenso, no era más que un descenso con una pendiente de dos grados. En una carretera en excelentes condiciones, una pendiente como ésta puede retener a un automóvil que se desliza con el motor apagado.

En lugares montañosos, estas ilusiones son bastante frecuentes, y dan origen en muchas ocasiones, a cuentos y leyendas fabulosos.

6. Ríos que corren monte arriba

Los ríos también presentan con frecuencia una ilusión óptica similar, cuyas aguas corren por pendientes ascendentes. Sobre esto hemos elegido una cita del libro "El sentido exterior" del físico alemán Prof. Berstein:

> *"Con frecuencia nos equivocamos fuertemente, al juzgar si la continuidad de una dirección horizontal, indica una inclinación ascendente o descendente. Si marchamos, por ejemplo, por un camino con una pendiente suave y observamos a cierta distancia otro camino que va al encuentro del primero, nos parecerá que el ascenso del segundo camino es mucho más empinado de lo que es en realidad. Al final quedamos sorprendidos al comprobar que el segundo camino no es tan empinado como lo habíamos imaginado."*

Figura 26. Al peatón le parece que el río corre hacia arriba

Esta ilusión se explica porque tomamos como línea de referencia, el camino por el que marchamos, para fijar la orientación de las demás pendientes.

Inconscientemente, lo identificamos con una línea horizontal, y por esto, es natural que aumentemos las pendientes de los demás caminos.

De acá se deduce que no percibimos la inclinación cuando andamos por un camino con una pendiente de 2 á 3 grados. En las calles de Moscú, Kiev y otras ciudades con colinas, muchas veces tenemos ese tipo de ilusiones, de las que habla el erudito alemán. Más curiosa aún, que la ilusión óptica que hemos mencionado, es aquella de la que se habla en muchos lugares, refiriéndose a "los ríos que corren monte arriba".

> *"Cuando descendemos por un camino poco inclinado, paralelo a la orilla de un arroyo (Fig. 25), y dicho arroyo corre con una leve inclinación horizontal, muchas veces nos parece que el arroyo corre hacia arriba (Fig. 26). En este caso, también consideramos que nuestro camino tiene una orientación horizontal, porque tomamos la referencia sobre la cual nos encontramos, como base para establecer la inclinación de las demás superficies"* (Berstein).

7. El experimento con la pértiga de hierro

Una pértiga de hierro perforada en el medio se encuentra sujeta a una delgada y sólida aguja, soportada por dos pilares. La pértiga puede girar alrededor de esta aguja que actúa como eje horizontal (Fig. 27). ¿En qué posición quedará la pértiga luego de dar varias vueltas?

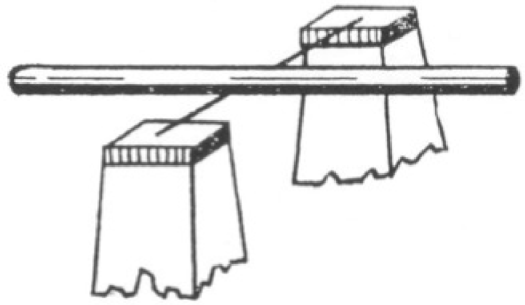


Figura 27. ¿Conserva su equilibrio?

Muchas veces se responde que la pértiga queda siempre en posición horizontal porque es la "única posición en la que conserva su equilibrio". Resulta difícil creer que al apoyar la pértiga en su centro de gravedad, conservará su equilibrio en *cualquier* posición.

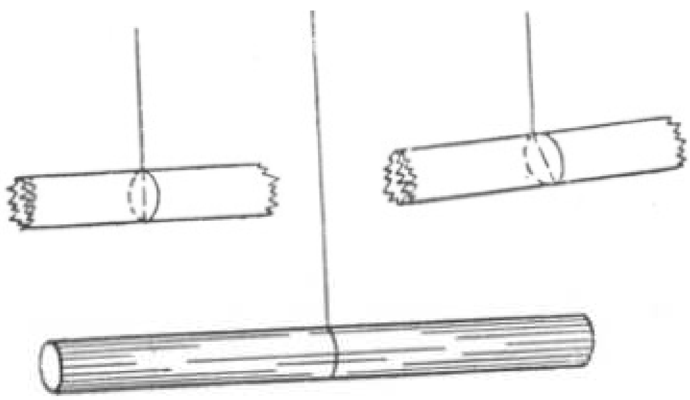


Figura 28.

¿Por qué se incurre en tantos errores al resolver correctamente este sencillo problema? Porque generalmente hemos visto que un palo suspendido y sostenido por el punto medio, se encuentra en posición horizontal. Por esta razón se suele responder a la ligera, que la pértiga apoyada sobre el eje, conserva su equilibrio en posición horizontal.

Sin embargo, una cosa es el palo suspendido de una cuerda, y otra cosa es la pértiga apoyada en una aguja, los dos se encuentran en diferentes condiciones. La pértiga perforada actúa sobre un eje; apuntalada sobre su centro de gravedad, y por esto posee lo que llamamos un equilibrio uniforme. El palo suspendido de un hilo, está colgado de su punto más *alto* y no de su centro de gravedad (Fig. 28). Un cuerpo suspendido de una cuerda, solo se halla en estado de reposo cuando su centro de gravedad se encuentra en línea con el punto de suspensión, o sea, cuando el palo se encuentra en posición horizontal; si se inclina el palo, su centro de gravedad quedará por fuera de esta línea (Fig. 28).

Por esta razón a muchas personas les resulta incomprensible que una pértiga montada sobre un eje horizontal, también puede conservar su equilibrio en una posición inclinada.

CAPÍTULO 4
LA CAÍDA Y EL SALTO

Contenido:

1. Las botas de Siete Leguas

Las botas de los cuentos legendarios existen en la realidad en una forma original: dentro de una maleta de viaje de tamaño mediano, se encuentra la cubierta de un pequeño aerostato (globo de gas)[1] y un tanque para el suministro de hidrógeno y se forma un globo de aire de 5 metros de diámetro. Un hombre atado a este globo, puede dar un salto alto y largo. Hay pocas probabilidades de que el hombre sea

[1]*Aerostato* o *aeróstato.* Aeronave más ligera que el aire que puede elevarse o permanecer inmóvil en el aire. Los aerostatos incluyen los *globos aerostáticos* (globos no propulsados, que se dejan llevar por las corrientes de aire), los *dirigibles* (globos autopropulsados que se maniobran como un avión) y los *helikites* (combinación de cometa y globo de helio). Existen aerostatos de aire caliente y aerostatos de gas.
Están compuestos por una bolsa que contiene una masa de gas o aire caliente más ligera que el aire exterior. De la parte inferior de la bolsa cuelga una estructura sólida denominada *barquilla*, o en su defecto, llevan unido algún otro elemento, por ejemplo, un sensor. *(N. del E.)*

arrastrado hacia arriba, porque la fuerza de ascensión del globo siempre es ligeramente menor que el peso del hombre.[2]

Cabe mencionar el globo estratosférico soviético, que ganó el record mundial de altura, un globo llamado "Saltarín", que prestó un gran servicio al Mando: ayudó a desenredar las cuerdas del globo estratosférico.

Es interesante calcular la altura que puede alcanzar un deportista provisto con un buen globo "saltarín".

El peso del hombre debe exceder únicamente en un kilogramo, la fuerza de ascensión del globo.

En otras palabras, si el hombre equipado con el globo pesa un kilogramo, lo que equivale a decir que pesa 60 veces menos que lo normal, ¿podrá dar un salto 60 veces mayor?

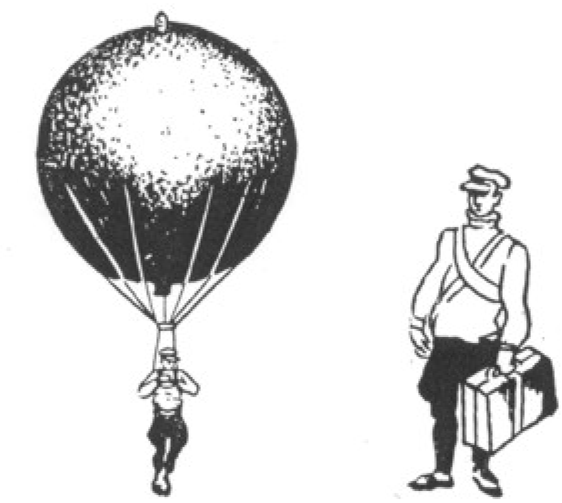


Figura 29. El globo saltarín y el modo de transportarlo

Veamos:

---

[2] Los soviéticos han tenido varios programas muy diversificados. Entre los años 30 y 60 del pasado siglo, se efectuaron bajo la órbita militar varios lanzamientos tripulados. Así los globos VOLGA y URSS en diferentes vuelos consiguieron colocar hombres en la estratosfera con diversa suerte. Paralelamente el vasto territorio de la ex URSS sirvió para diversos estudios de radiación cósmica y geomagnetismo. Han tenido centros activos de lanzamiento de globos pequeños y medianos, entre los años 50 y 70, en Apatity (Murmansk), Crimea (en la costa norte del Mar Negro), Dolgoprudnaya (cerca de Moscú), Yakutsk (en Siberia Oriental), operados por diversos institutos científicos Soviéticos.

Actualmente solo se encuentran activos los centros de lanzamiento de Volsk (región de Saratov) y de Kliuchi (península de Kamchatka), ambos operados por el instituto Levedev. Asimismo existe una empresa llamada DKBA establecida en Dolgoprudnaya y que hoy es la única firma que fabrica globos estratosféricos en la Federación Rusa. *(N. del E.)*

El hombre que se halla sujeto al globo empujará hacia abajo, junto con el globo, con una fuerza de 1.000 gramos, o sea 1.000.000 de dinas aproximadamente. El peso del globo lleno, que se puede calcular fácilmente, es igual a 20 kilogramos aproximadamente. Es decir, que la fuerza de 1.000.000 de dinas obra sobre una masa de 20 + 60 = 80 kilogramos.

La aceleración *a*, adquirida por la masa de 80 kilogramos debido a la fuerza de 1.000.000 de dinas es igual a:

$$a = \frac{f}{m} = \frac{1.000.000}{80.000} \approx 12 \text{ cms/seg}^2$$

El hombre, en condiciones normales, no se puede elevar a una altura de más de 1 metro.

Calculamos la velocidad inicial, *v*, de la fórmula:

$$v^2 = 2\ gh;$$

$$v^2 = 2 \times 980 \times 100 \text{ cm}^2/\text{seg}^2$$

y de allí resulta que

$$v \approx 440 \text{ cm/seg}$$

Estando sujeto el cuerpo del hombre al globo, durante el salto, alcanza tantas veces menos velocidad cuantas veces mayor es la masa del hombre junto a la del globo, en comparación a la simple masa del hombre. (Este es el resultado de la fórmula $f \cdot t = m \cdot v$; la fuerza *f* y el tiempo *t*, y sus efectos en ambos casos son los mismos; eso quiere decir que son también igual a la cantidad del movimiento *mv*; de allí resulta claramente, que la aceleración disminuye en proporción inversa a la masa).

Así que, la velocidad del salto con globo es igual a:

$$440 \text{ x } \frac{60}{80} = 330 \text{ cms/seg}$$

Ahora se puede calcular fácilmente la altura *h* del salto, con ayuda de la fórmula

$$v^2 = 2ah:$$

$$330^2 = 2 \times 12 \times h$$

de ahí resulta que

$$h = 4.500 \text{ centímetros} = 45 \text{ metros}$$

Y así el hombre colgado de un globo, en condiciones ordinarias, al dar un salto de un metro de largo, alcanza una altura de 45 metros, logrando así su máximo rendimiento.

Resulta interesante calcular la duración del salto, partiendo de la fórmula $h = at^2 /2$. Para alcanzar una altura de 45 m, con una aceleración de 12 cm/seg^2, emplea:

$$t = \sqrt{\frac{2h}{a}} = \sqrt{\frac{9.000}{12}} = 27 segs.$$

Por lo tanto, para saltar hacia arriba y volver a caer al piso emplea 54 segundos.

Estos saltos lentos por el aire, se deben naturalmente a su baja aceleración. Una sensación igual, en caso de saltos, Podemos experimentar una sensación similar sin emplear el globo, saltando en cualquier astro en el que la aceleración de la gravedad sea 60 veces más débil que la de nuestro planeta.

Resulta interesante efectuar el cálculo para determinar la longitud de saltos más grandes. Para poder hacer un salto largo, el deportista debe inclinarse al saltar, en determinado ángulo respecto a la horizontal. Su cuerpo se desplaza con una velocidad *v* (Fig. 30). Esta velocidad tiene dos componentes, una componente vertical, v_1, y una componente horizontal, v_2. Estas componentes son:

$$v_1 = v \text{ sen } (\alpha)$$
$$v_2 = v \cos (\alpha)$$

La velocidad v_1, en el tiempo t, es:

$$v_1 = at$$

de donde:

$$t = v_1/a$$

por lo tanto:

$$t = v \text{ sen } (\alpha)/a$$

Figura 30. ¿Cómo vuela un cuerpo cuando parte con una determinada inclinación sobre el horizonte?

Esto quiere decir, que la duración total del ascenso y el descenso del cuerpo es:

$$2t = (2v \text{ sen } (\alpha)) / a$$

La velocidad v_2 es constante durante todo el tiempo de vuelo, independientemente de que el cuerpo suba o baje. En este intervalo, el cuerpo es transportado por el espacio

$$S = 2v_2 t = 2v\cos(\alpha)\frac{v sen(\alpha)}{a} = \frac{2v^2}{a}sen(\alpha)\cos(\alpha) = \frac{v^2 sen(2\alpha)}{a}$$

Esta es la longitud del salto.

Esta longitud alcanza su valor máximo cuando: *sin*(2*a*) = 1, ya que el *seno de un ángulo* no puede ser mayor que la unidad. De acá resulta que 2*a* = 90º, y por lo tanto, *a* = 45º. Lo que quiere decir que, cuando no se tienen condiciones atmosféricas adversas, el deportista efectúa el salto más largo posible cuando parte del piso con un ángulo de 45º. Podemos calcular la longitud del máximo salto posible, empleando la fórmula

$$S = \frac{v^2 sen(2\alpha)}{a}$$

Reemplazando acá los valores antes obtenidos, *v* = 330 cm/seg, *sen (2a)* = 1; *a* = 12 cm/seg^2.

$$S = 330^2 / 12 = 9.000 \text{ cm} = 90 \text{ m}$$

Efectuando un salto de unos 45 metros de altura, con un ángulo de 45 grados, se alcanzará una longitud horizontal de 90 metros; esto da la posibilidad de saltar por encima de un edificio de varios pisos.[3]

Se puede experimentar en pequeña escala, colgando una figura de papel de un globo de aire para niños, figura cuyo peso sea ligeramente mayor que la fuerza de ascensión del globo. Dando un ligero impulso a la figura, ésta sube y luego baja suavemente. Sin embargo, en este caso las corrientes de aire, juegan un papel más relevante que en el caso del salto de un deportista real.

2. El hombre bala[4]

[3] Conviene recordar que, al realizar un salto vertical con un ángulo de más de 45º, se logra alcanzar casi el doble de altura, con la misma rapidez inicial. Esto se deduce de la fórmula: *Altura* **=** $v^2.sen^2(a)/2a$ *(N. del E.)*

[4] Un "hombre bala" (Human-cannon-Ball o The bullet-man) es una persona que se expulsa desde un cañón hidráulico diseñado para tal fin. El impulso es proporcionado por un muelle elástico o un resorte de aire

"El hombre bala", uno de los números más atractivos de los espectáculos circenses, que se ejecuta en los últimos tiempos en muchas ciudades de Europa y América, se estrenó en el circo de Moscú, en 1.934 y luego en el circo de Leningrado. Consiste en que el artista se ubica dentro del tubo de un cañón y es lanzado desde allí por medio de un tiro al aire, describiendo un arco y cayendo en una red a una distancia de 30 metros del cañón (Fig. 31).

Hemos visto un número similar en la conocida película "El Circo",[5] donde el artista parece volar desde el cañón hasta la cúpula del circo. Es necesario poner entre comillas "tiro de cañón", porque no se trata de un cañón real, ni de un verdadero tiro.

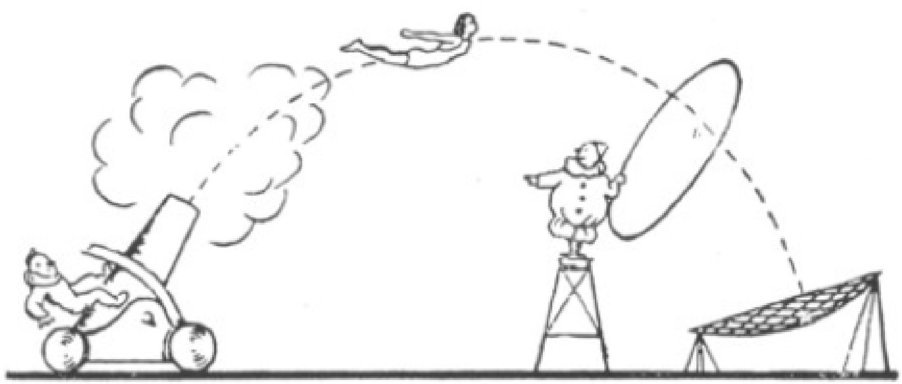


Figura 31. El "hombre bala" en el circo.

A pesar de que la boca del arma despide humo, el artista no es arrojado por la fuerza explosiva de la pólvora. El humo se produce para provocar un efecto visual, haciendo creer al público que se trata de un disparo de verdad. De hecho, la fuerza motriz se debe a unos muelles que actúan al mismo tiempo que se despide el humo

---

comprimido, en lugar de pólvora. Suele hacer parte de espectáculos circenses, en los que se emplea la pólvora para agregar efectos visuales y auditivos al número.
El hombre bala aterriza sobre una red horizontal. En espectáculos al aire libre, se emplea una zona de agua en lugar de la malla. En 1.877, se presentó por vez primera este número, representado por "Zazel" (Rossa Matilda Richter), una chica de 14 años de edad. Un militar italiano, George Farini, desarrolló el cañón de resorte empleado para el lanzamiento, durante la función creada por el Barnum Circus del empresario y artista circense estadounidense Phineas Taylor (1.810 - 1.891).
El actual récord del mundo de lanzamiento de un hombre bala es de 56,54 metros, efectuado por David "Bala" Smith, el 18 de mayo de 1.998, en Kennywood Park, West Mifflin, Pennsylvania, Estados Unidos. Se estima que David Smith voló a unos 112 km/h. *(N. del E.)*

[5] *El Circo* (The Circus). Película estadounidense de 1.928 dirigida, producida y protagonizada por Charles Chaplin. Gracias a ella, ganó un Óscar en 1.929. *(N. del E.)*

y se produce el ruido del cañón, creando así la ilusión de que el hombre-bala es lanzado por el aire mediante una carga de pólvora.

En el Fig. 32 se muestra el esquema del mencionado número de circo. En la siguiente tabla se muestra en números, la ejecución del número del "hombre-bala" realizada por el artista Leinerton, quien trabajó en diversos circos de la URSS:

Pendiente del cañón	70 grados
Altura máxima del vuelo	19 metros
Longitud del tubo del cañón	6 metros

Para la Mecánica, son de gran interés las condiciones extremas en las que trabaja el artista durante la ejecución de este número. Al momento del lanzamiento, su cuerpo experimenta una enorme presión, con un considerable aumento de la fuerza de gravedad. Luego, durante el tiempo del vuelo libre, el artista, igual que cualquier cuerpo libre, no pesa nada.

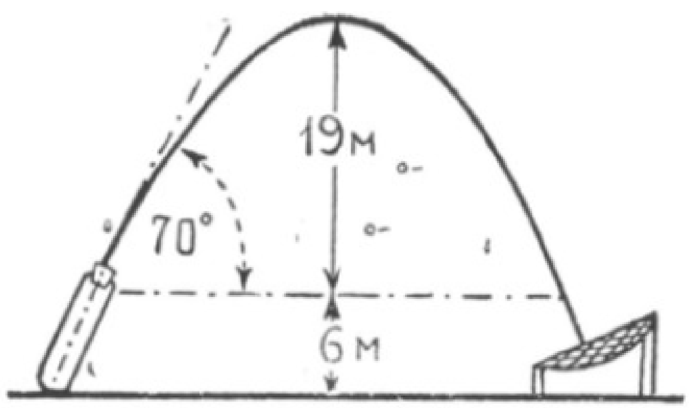


Figura 32. Esquema del vuelo del "hombre bala" en el circo

Finalmente, al descender de la red, el artista experimenta nuevamente un aumento de la fuerza de gravedad. Los artistas de mayor altura, son los que mejor han podido resistir estos cambios sin afectar su salud. Estos resultados son muy valiosos para los tripulantes de los vuelos que se emprenderán en el futuro, en cohetes dirigidos hacia el espacio interplanetario, tripulantes que han de soportar estas mismas sensaciones.

En la primera fase del movimiento del artista, que se encuentra todavía dentro del tubo del cañón, nos interesa el valor de la gravedad artificial. Podemos averiguarlo al calcular la velocidad del cuerpo dentro del tubo del cañón. Para esto es necesario conocer el tiempo que tarda el cuerpo en salir del cañón, y también la velocidad que adquiere al salir del mismo. Se conoce la longitud: 6 metros. También se puede calcular la velocidad, sabiendo que es la velocidad requerida para lanzar hacia arriba un cuerpo libre, que debe alcanzar una altura máxima de 19 metros. En el capítulo anterior deducimos la fórmula:

$$t = \frac{v\, sen(\alpha)}{a}$$

donde *t* es la duración del ascenso, *v* es la velocidad inicial, *a* es ángulo en el cual se lanza el cuerpo y *a* es la aceleración. Además de esto conocemos la altura *h* del ascenso.

Así que:

$$h = \frac{g\, t^2}{2} = \frac{g}{2}\left[\frac{v\, sen(\alpha)}{a}\right]^2$$

$$h = \frac{g.v^2.sen^2(\alpha)}{2.a} = \frac{v^2.sen^2(\alpha)}{2.g}$$

de donde se puede calcular la velocidad *v*:

$$v = \frac{\sqrt{2gh}}{sen(\alpha)}$$

El significado contextual de esta fórmula, se interpreta del siguiente modo:

g = 9,8 m/seg^2, α = 70º. Referente a la altura igual a (25 - 6) m = 19 m Y por lo tanto la velocidad buscada es

$$v = \frac{\sqrt{19{,}6 \text{ x } 19}}{0{,}94} = 20{,}6 \text{ m/seg}$$

Esta es la velocidad del cuerpo del artista al salir del cañón; de ésta se puede deducir aceleración que lleva dentro del tubo del cañón. Aplicando la fórmula $v^2 = 2aS$, obtenemos

$$a = \frac{v^2}{2S} = \frac{20{,}6^2}{12} = 35 \text{ m/seg}^2$$

Hemos averiguado la aceleración con la cual se mueve el cuerpo del artista dentro del tubo del cañón, 35 m/seg^2, es decir 3 ½ veces mayor que la aceleración ordinaria de la fuerza de gravedad. Por esto, al momento de lanzar al artista fuera del cañón, este pesa 4 ½ veces más de lo normal: a su peso normal se le agrega un peso artificial correspondiente a 3 ½ veces del peso corriente,[6] ¿Durante cuánto tiempo siente mayor peso el artista?

De la fórmula resulta que:

$$S = \frac{at^2}{2} = \frac{at \text{ x } t}{2} = \frac{vt}{2}$$

$$6 = \frac{20{,}6 \text{ x } t}{2}$$

de aquí se obtiene el valor

$$t = \frac{12}{20{,}6} = 0{,}6 \text{ segundos}$$

[6] Este valor es aproximado porque la gravedad artificial actúa en un ángulo de 20 grados con respecto a la vertical, siendo completamente perpendicular su orientación normal. No obstante, la diferencia es muy pequeña.

Lo que quiere decir que el artista siente un peso unos 300 kg durante ½ segundo, en lugar de los 70 kg que suele pesar.

Pasemos ahora a la segunda fase del número de circo, al vuelo libre del artista en el aire.

Aquí nos interesa la duración del vuelo ¿durante cuánto tiempo el artista no siente ningún peso?

En el tema anterior, vimos que la duración de un vuelo como este es igual a

$$\frac{2v\, sen(\alpha)}{a}$$

Reemplazando en la fórmula las variables por sus valores correspondientes, obtenemos que la duración buscada es igual a

$$\frac{2 \text{ x } 20{,}6 \text{ x } sen(70^o)}{9{,}8} = 3{,}9 \text{ segundos}$$

Estado que se mantiene cerca de 4 segundos.

En la tercera fase del vuelo igual que en la primera, encontramos un aumento artificial de la gravedad, permaneciendo algún tiempo en este estado. Si la red se encuentra a la altura de la boca del cañón, el artista desciende con la misma velocidad con la que comenzó su vuelo. Pero si la red se extiende un poco más abajo, la velocidad de caída del artista sobre la malla, será mayor que la de partida; pero como la diferencia de peso es pequeña y no afecta considerablemente los cálculos, la podemos despreciar.

Supongamos por ejemplo, que el artista baja hacia la red con una velocidad de 20,6 m/seg, y según nuestros cálculos el artista debe bajar 1,5 metros, quiere decir para recorrer 1,5 m a razón de 20,6 m/seg requiere de 0,7 seg, o sea casi igual a cero. Pero según la fórmula

$$v^2 = 2aS,$$

tenemos que

$$20{,}6^2 = 2a \times 1{,}5$$

De donde se obtiene que su aceleración es de:

$$a = \frac{20{,}6^2}{2 \text{ x } 1{,}5} = 141 \text{ m/seg}^2$$

Sabemos que al bajar a la red, el artista alcanza una aceleración de 141 m/seg^2, un valor 14 veces mayor que el de la aceleración normal de la gravedad. Durante este tiempo el artista se siente 15 veces más pesado de lo normal. Este estado dura, sin embargo

$$t = \frac{S}{v} = \frac{2 \text{ x } 1{,}5}{20{,}6} \approx 1/7 \text{ segundo}$$

Ni el organismo más habituado de los cirqueros sería capaz de soportar, sin sufrir graves daños, un aumento de 15 veces el valor de la gravedad, si éste no durara un pequeñísimo espacio de tiempo. ¡Pues un hombre de 70 kilogramos, pesaría en este lapso de tiempo, una tonelada! La exposición a estas condiciones extremas durante un tiempo prolongado, aplastaría al hombre y le dificultaría la respiración, es decir, que los músculos no "soportarían" la fuerza de gravedad ejercida sobre las células torácicas.

3. Record del lanzamiento de bala

Durante la espartaquiada[7] koljosiana-sovjosiana[8] en Járkov, en el año 1.934, la deportista Sinizkaya sentó un nuevo récord para la URSS en el lanzamiento de bala

---

[7] *Espartaquiada*. Nombre de una serie de eventos multideportivos organizados por la Sportintern entre 1.928 y 1.937. Posteriormente se extendió a todos los eventos deportivos realizados en la URSS y después de 1.945 en Europa del Este (Polonia, RDA, Hungría, Checoslovaquia, Bulgaria, Rumania, Albania y Yugoslavia). El nombre proviene de Espartaco. También se les conoce como *Olimpiadas Obreras*. *(N. del E.)*

con dos manos: record de 73 metros 92 centímetros ¿Hasta dónde deben lanzar la bala los deportistas de Leningrado, si quieren vencer este record?

Solución:

Podría decirse que la respuesta es sencilla: solo hace falta lanzar la bala un centímetro más lejos. Aunque a cualquier deportista le parezca extraño, esta respuesta no es correcta. Si una persona lanzase en Leningrado la bala a una distancia 5 centímetros más corta que el récord antes indicado, para ser exactos, esta persona debería ser considerada como vencedora del récord de Sinizkaya.

Nuestro lector seguramente imagina de qué se trata. La longitud del lanzamiento de la bala depende de la aceleración de la fuerza de gravedad, y la gravedad es mayor en Leningrado que en Járkov. Comparando los resultados en ambos puntos, sin tener en cuenta la diferencia entre la atracción de la gravedad, se puede caer en un grave error: en Járkov, la naturaleza ofrece a los deportistas condiciones más favorables que en Leningrado.

Analicemos un poco esta teoría. En caso de ausencia de la resistencia de aire, el espacio recorrido por un cuerpo en movimiento, cuya trayectoria forma un ángulo *a* con el horizonte, y se desplaza a una velocidad *v*, se define mediante la fórmula:

$$S = \frac{v^2 sen(2\alpha)}{g}$$

La aceleración de la gravedad, *g*, varía de un punto a otro, según su latitud, tal como se ilustra, a modo de ejemplo, en la siguiente tabla.

Lugar	*Latitud*	*Aceleración de gravedad*
Arcángel	64° 30’	982,0 cm/seg^2

[8] La agricultura es una de las principales formas de subsistencia en la Unión Soviética. Durante la existencia de la URSS se dan dos tipos de explotaciones agrícolas: los *sovjoces*, de propiedad estatal, en los que los agricultores trabajan por un salario para el Estado, como funcionarios; y los *koljoces* de propiedad colectiva, pero en los que los propietarios son los agricultores, y por lo tanto se reparten los beneficios entre todos. Son dueños de sus viviendas y de un *dvor*, o pequeño lote de tierra en el cada cual cultiva productos de huerta y ganado menor, para el consumo propio. *(N. del E.)*

Leningrado	60°	981,9 cm/seg^2
Járkov	50°	981,1 cm/seg^2
El Cairo	30°	979,3 cm/seg^2

De la fórmula dada para la longitud del lanzamiento, se observa que la distancia es inversamente proporcional al valor de la gravedad, g.

$$S.g = v^2 sen(2\alpha)$$

Por lo tanto, manteniendo la bala con idéntica velocidad y el mismo ángulo respecto al horizonte, en un lugar con gravedad g_1, se tiene:

$$S_1.g_1 = v^2 sen(2\alpha)$$

Y en un lugar con gravedad g_2, se tiene:

$$S_2.g_2 = v^2 sen(2\alpha)$$

De donde:

$$\frac{S_1.g_1}{S_2.g_2} = \frac{v^2 sen(2\alpha)}{v^2 sen(2\alpha)} = 1$$

Por lo tanto:

$$S_1.g_1 = S_2.g_2$$

Entonces:

$$S_1 = \frac{S_2.g_2}{g_1}$$

Estos cálculos indican que si se lanza una bala en Járkov (g_2 = 9,811 m/seg^2) a una distancia de 73 metros 92 centímetros (S_2 = 73,92 m), al lanzar la misma bala con idéntica fuerza en otros lugares, alcanzará estas distancias:

Lugar	*Gravedad (g_1)*	*Distancia (S_1)*
Arcángel	9,793 m/seg^2	73,85 metros
Leningrado	9,820 m/seg^2	73,86 metros
El Cairo	9,819 m/seg^2	74,05 metros

Así que, para alcanzar en Leningrado el record de lanzamiento de bala de la deportista de Járkov, 73,92 metros, basta lanzar la bala por encima de los 73,86 metros.

Los deportistas de El Cairo, que repitieron la prueba de Járkov quedaron en realidad 12 centímetros por debajo del record, mientras que los deportistas de Arcángel, que lanzaron la bala una distancia de 7 centímetros por debajo de la de Sinizkaya, fueron quienes realmente batieron el record establecido.

4. El puente averiado

Un caso desconcertante es el que describe Julio Verne en su novela, *La vuelta al mundo en 80 días*.

Figura 33.- El episodio del puente.

El puente colgante del ferrocarril en las Montañas Rocosas (América) estaba a punto de desplomarse por haberse averiado una viga. A pesar de ello, el valiente maquinista, "un verdadero yanqui", decidió cruzarlo con un tren de pasajeros.

"- ¡Pero el puente puede hundirse!

"-Eso no tiene importancia. Si ponemos el tren a todo vapor, tenemos posibilidades de pasarlo.

"El tren avanzó con una velocidad increíble. Los émbolos dieron 20 vueltas por segundo.

Los ejes humeaban. El tren no tocaba los rieles. Se eliminó el peso y se transformó en velocidad... Se cruzó el puente. El tren voló de un lado al otro del puente. Pero una vez que el tren pasó el río, el puente, se desplomó cayendo al agua, con gran estrépito."

¿Es inverosímil esta historia? ¿Es posible "sustituir" el peso por la velocidad? Nosotros sabemos que los terraplenes de los ferrocarriles sufren más con la marcha rápida de los trenes que con la marcha lenta; en tramos débiles del camino se recomienda, por lo tanto, marchar con mayor lentitud. Sin embargo. En el caso descrito acá, la salvación fue la marcha a gran velocidad ¿esto es posible?

Es probable que en el caso descrito sea verosímil. En las condiciones dadas, el tren pudo haber cruzado el puente averiado, a pesar que este se desmoronara después. Esto se debió a que el tren cruzó el puente en un intervalo de tiempo pequeño. Un instante tan breve que el puente no tuvo tiempo de desmoronarse... Efectuemos un cálculo. Las ruedas de un tren de pasajeros tienen un diámetro de 1,3 metros. "Los émbolos dieron 20 vueltas por segundo", o sea que una rueda del tren en movimiento, da 10 vueltas completas, es decir $10 \times 3,14 \times 1,3$. Esto significa que el tren avanzaba a 41 m/seg. El río seguramente no era muy ancho y la longitud del puente podría ser de unos 10 metros. Esto quiere decir, que con esta velocidad, el tren cruzó el puente en ¼ de segundo. Por otro lado, si el puente comenzó a caer con los primeros movimientos del tren, entonces el cruce de este tramo averiado, durante ¼ de segundo, no fue mayor que

$$\frac{1}{2}gt^2 = \frac{1}{2} \text{ x } 9,8 \text{ x } \frac{1}{16} \approx 0,3 \text{ metros}$$

es decir, 30 centímetros. El puente no se desplomó en ambos extremos a la vez, sino que comenzó por aquel punto por el cual ya había pasado el tren. Cuando esta parte del puente comenzó a desmoronarse, cayendo los primeros centímetros, el extremo opuesto se mantuvo en contacto con la orilla y así el tren (en un tiempo muy breve) pudo alcanzar la orilla opuesta, en el instante que antecedió al desmoronamiento de este extremo. En este sentido se debe interpretar lo dicho por el novelista: "Se eliminó el peso y se transformó en velocidad".

Lo inaceptable del episodio consiste en que: "Los émbolos dieron 20 vueltas por segundo", o sea que el tren iba a una velocidad de 150 kilómetros por hora. El tren no puede desarrollar esta velocidad en el tiempo indicado.

Hay que anotar que jamás se ejecutó una hazaña similar a la de este maquinista americano, que se arriesgó a pasar velozmente por el puente averiado, el cual se habría desmoronado bajo el peso del tren, en caso de haberlo cruzado a baja velocidad.

5. Tres caminos

En una pared perpendicular se ha trazado un círculo (Fig. 34) cuyo diámetro es igual a 1 metro. De su punto más alto a lo largo de las cuerdas *AB* y *AC* va un pequeño canal. Desde el punto *A* se tiran simultáneamente tres bolitas de plomo: una de ellas corre libremente hacia abajo, las otras dos se deslizan (sin rodar) por el canal. ¿Cuál de las tres bolitas de plomo llega primero a la circunferencia?

Como el camino del canal *AC* es el más corto, se puede pensar que la bolita de plomo que corre por él, alcanza la circunferencia antes que las demás. El segundo lugar lo debe ocupar aparentemente, la bolita que corre por el canal *AB*; y finalmente, alcanzará la circunferencia la bolita que cae verticalmente.

La experiencia muestra que estas conclusiones son erróneas: todas las bolitas alcanzan la circunferencia al mismo tiempo.

Esto se debe a que todas las bolitas se mueven con velocidades diferentes: la que se mueve con más rapidez, es la que cae libremente, y de las otras dos que se deslizan por los canales, la que más rápido corre, es la que rueda por el camino más inclinado. La bolita que va por el camino más largo, es la que se mueve con mayor rapidez y se puede afirmar, que la ventaja de la mayor velocidad es justamente equivalente a la pérdida evidente que significa el camino más largo.

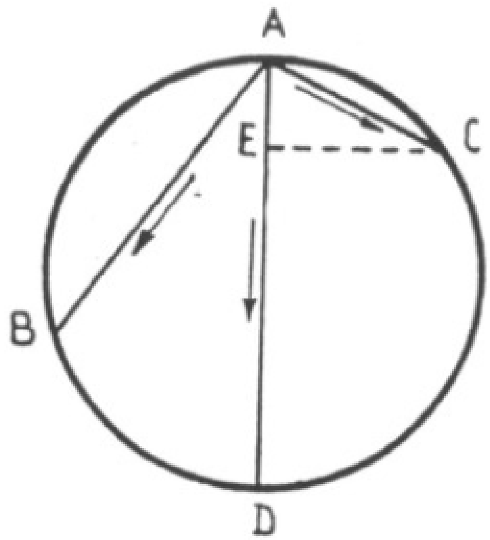


Fig. 34.—El problema de los tres caminos.

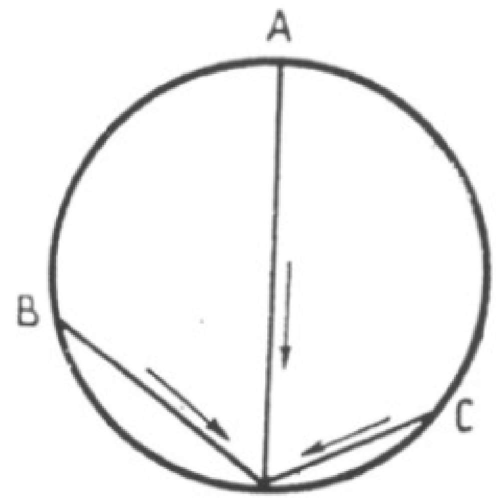


Fig. 35.—El problema de Galileo.

En este caso la duración *t* de la caída por la línea vertical *AD* (sin tener en cuenta la oposición del aire) es

$$AD = \frac{gt^2}{2}$$

de allí resulta que

$$t = \sqrt{\frac{2AD}{g}}$$

La duración t_1 del movimiento por el canal *AC* es igual a

$$t_1 = \sqrt{\frac{2AC}{a}}$$

donde *a* es la aceleración del movimiento sobre la línea inclinada *AC*, pero fácilmente se deduce que:

$$\frac{a}{g} = \frac{AE}{AC}$$

$$a = \frac{AE \text{ x } g}{AC}$$

De la Fig. 34 se observa que

$$\frac{AE}{AC} = \frac{AC}{AD}$$

y por consiguiente

$$a = \frac{AC}{AD} \text{ x g}$$

Esto quiere decir

$$t_1 = \sqrt{\frac{2 \text{ x } AC}{a}} = \sqrt{\frac{2 \text{ x } AC \text{ x } AD}{AC \text{ x } g}} = \sqrt{\frac{2 \text{ x } AD}{g}} = t$$

Y, así $t = t_1$, es decir la duración del movimiento de la bola que se desliza por el canal es igual a la duración de la bola que se desliza por el diámetro del círculo.

Esto no solo es válido para *AC*, sino también para cualquier canal que salga del punto *A*.

También se puede plantear el problema de otra forma. Tres cuerpos que se encuentran dentro de un círculo vertical, se mueven por las líneas *AD*, *BD* y *CD*, debido a la fuerza de gravedad (Fig. 35). El movimiento comienza simultáneamente desde los puntos *A*, *B*, y *C*. ¿Cuál cuerpo es el primero en llegar al punto *D*?

El lector seguramente afirmará que los cuerpos deben alcanzar el punto *D* al mismo tiempo.

Este problema fue planteado y resuelto por Galileo en su libro *Diálogos sobre dos nuevas ciencias*, obra en la que expone por vez primera la ley de la caída de los cuerpos.

En esta obra encontramos la teoría indicada, formulada por Galileo, del siguiente modo: "Si desde el punto más alto del círculo, se trazan diferentes planos inclinados que llegan hasta la circunferencia, el tiempo de la caída de los cuerpos que se deslizan sobre dichos planos es siempre igual".

6. El problema de las cuatro piedras

Desde la cúspide de una torre muy alta se tiran con la misma velocidad 4 piedras; la primera, verticalmente hacia arriba; la segunda, verticalmente hacia abajo; la tercera, horizontalmente a la derecha y la cuarta, horizontalmente a la izquierda.

¿Qué forma tiene el rectángulo que forman las piedras durante su caída? En este problema no se tiene en cuenta la resistencia del aire.

La mayoría de las personas comienza la solución de este problema partiendo de que las piedras al caer forman un cuadrilátero, figura que recuerda la forma de una cometa de papel. Se razona así: la piedra que se tira hacia arriba, se aleja del punto de partida con mayor lentitud que la piedra que se tira hacia abajo; las piedras que se tiran hacia los lados caen siguiendo trayectorias curvas, con una velocidad media. En este caso no se tiene en cuenta la velocidad con la que baja el centro de la figura geométrica que se forma.

Es fácil hallar la solución correcta, efectuando el siguiente análisis: Si se tiene en cuenta que la gravedad no es absoluta, las piedras lanzadas al aire, siempre ocuparán los vértices de un cuadrado. Pero ¿qué pasa si introducimos la acción de la gravedad? En un medio donde no se presentan variaciones, todos los cuerpos caen con la misma velocidad. Por esta razón las cuatro piedras recorren la misma distancia bajo la acción de la fuerza de gravedad, es decir: que el cuadrado se mueve paralelo a sí mismo y se conserva su forma.

Así que las piedras que caen, forman un cuadrado.

Al problema analizado, le agregamos el siguiente:

7. El problema de las dos piedras

De lo alto de una torre, como en el caso anterior, lanzamos dos piedras con una velocidad de 3 m/seg: una piedra en dirección vertical hacia arriba y la otra verticalmente hacia abajo. ¿A qué velocidad se aleja una de la otra? Se desprecia la resistencia del aire.

Efectuando los cálculos, como en los casos anteriores, encontramos fácilmente la respuesta correcta: las piedras se alejan una de la otra a una velocidad de 3 + 3, es decir 6 metros por segundo. En este caso la velocidad de la caída no afecta el resultado, como es de esperar; por lo tanto se obtendrá el mismo resultado para cualquier cuerpo celeste: la Tierra, la Luna, Júpiter, etc.

8. Los juegos de pelota

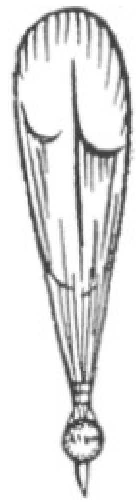
Un jugador lanza la pelota a su compañero de juego, que se encuentra a una distancia de 28 metros de él. La pelota viaja por el aire durante cuatro segundos. ¿Cuál es la altura máxima que alcanza esta pelota?

La pelota se mueve durante 4 segundos, realizando al mismo tiempo un desplazamiento en dirección horizontal y otro en dirección vertical. Es decir, que para el ascenso y el descenso la pelota empleó 4 segundos; 2 segundos para el ascenso y otros 2 para el descenso (en los manuales de mecánica se demuestra que el ascenso y el descenso tienen igual duración). Por lo tanto, la pelota alcanza una altura de:

$$S = \frac{gt^2}{2} = \frac{9{,}8 \text{ x } 2^2}{2} = 19{,}6 \text{ metros}$$

Así que, la altura máxima de la pelota es de unos 20 metros. Para realizar este cálculo no se necesitó la distancia dada entre los jugadores (28 metros).

Cuando la velocidad es muy baja, se puede despreciar la resistencia del aire.



CAPÍTULO 5
EL MOVIMIENTO GIRATORIO

Contenido:

1. Medio sencillo para moverse en torno a sí mismo

Muchas veces sentimos el fuerte deseo de "movernos alrededor nuestro". Si solo se tratara de este deseo, en verdad fácil de satisfacer, bastaría con sentarnos en una montaña rusa o en un carrusel[1] en movimiento; que debido a las vueltas que da, nos hace perder la noción del lugar en que nos encontramos.

[1] El *carrusel*, *tiovivo* o *calesita* es un medio de diversión que consiste en una plataforma giratoria con asientos para los pasajeros. Tradicionalmente los "asientos" son de madera y en forma de caballos u otros animales; estos se mueven mediante un mecanismo especial hacia arriba y hacia abajo, simulando el galope del caballo. El carrusel suele tener un equipo de sonido para ofrecer música de fondo, mientras está en funcionamiento.

Girando con naturalidad sobre los caballitos del carrusel o en la montaña rusa, sin darse cuenta de que se encuentran sentadas sobre una máquina, las personas se mueven alrededor de sí mismas. Un cálculo sencillo nos indica la cantidad de vueltas que dan.

MN (Fig. 36) es el eje, alrededor del cual giran las carretillas de estos aparatos.

Cuando toda gira la máquina, las carretillas suspendidas a ella tienden, junto con sus ocupantes, a moverse por inercia en dirección tangente y, por lo tanto, a alejarse del eje, y ocupar una posición inclinada, tal como se indica en la Fig. 36.

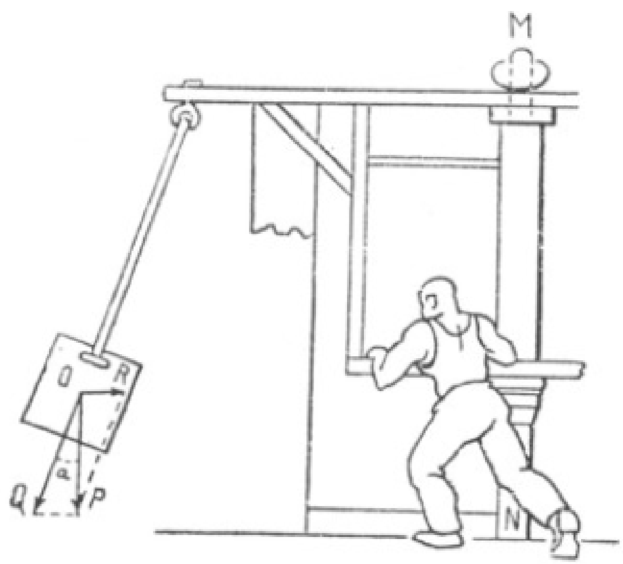


Figura 36. El motor vivo del carrusel. Comprobación de las fuerzas que actúan sobre las carretillas o caballitos.

El peso *P* del ocupante se reparte debido a esto sobre dos fuerzas: una fuerza, *R*, en dirección horizontal hacia el eje, llamada fuerza centrífuga, que es la que mantiene el movimiento circular; la otra fuerza, *K*, se orienta en la dirección del cable que soporta el asiento del ocupante, y comprime al viajero contra el asiento; el viajero siente esta fuerza como un peso que obra sobre él. Este peso nuevo, como vemos, normalmente es mayor que el peso real, *P*, del ocupante, e igual a

$$Q = P / \cos(\alpha)$$

Los carruseles modernos se componen de caballos; los carruseles antiguos llevaban varios animales, entre ellos, perros, caballos, conejos, cerdos y ciervos. *(N. del E.)*

Para encontrar el ángulo α, entre *P* y *Q*, hace falta saber el valor de la fuerza *R*. Esta fuerza es centrífuga; por lo tanto, genera su propia aceleración:

$$a = v^2 / r$$

donde *v*, es la velocidad de giro de la carretilla y *r* es el radio del movimiento circular; esto quiere decir que el auténtico centro de gravedad de la carretilla depende del eje *MN*. Normalmente, la distancia del asiento al eje central es de 6 metros y el carrusel gira a razón de 4 vueltas por minuto, por lo tanto, la carretilla recorre 1/15 de vuelta en un segundo. De acá podemos calcular la velocidad circular

$$\mathrm{v} = 2\pi \mathrm{nv}$$

Siendo *v*, la velocidad circular, *r*, el radio de giro y, *n*, el número de vueltas/seg.

$$v = \frac{1}{15} \text{ x } 2 \text{ x } 3{,}14 \text{ x } 6 = 2{,}5 \text{ m/seg}$$

Ahora buscaremos la cantidad de la aceleración, engendrada en la fuerza *R*:

$$a = \frac{v^2}{r} = \frac{250^2}{600} = 104 \text{ cms/seg}^2$$

Y la fuerza proporcional de la aceleración es igual a

$$tg(\alpha) = \frac{a}{g} = \frac{104}{980} = 0{,}1061 \Rightarrow \alpha = 7^{o}$$

Anteriormente hemos expuesto que el peso nuevo

$$Q = \frac{P}{cos(\alpha)}$$

Esto significa que

$$Q = \frac{P}{cos(7^o)} = \frac{P}{0{,}994} = 1{,}006P$$

Si un enfermo en condiciones normales pesaba 60 kilos, entonces ahora debe añadir 360 gramos a su peso. Pero se comprenderá que este aumento de peso no mejorará en nada su estado de salud, pues nadie se siente mejor dando vueltas en un carrusel o en una montaña rusa, que permaneciendo en reposo sobre la tierra.

En los aparatos giratorios corrientes, cuyo movimiento es relativamente lento, es imperceptible el aumento del peso; en las máquinas centrífugas de radio pequeño, que giran con gran rapidez, el peso puede tener un aumento considerable. En algunos laboratorios americanos se emplean estas máquinas, llamadas "ultracentrífugas",[2] que giran a razón de 80.000 vueltas por minuto. ¡Con ayuda de estos aparatos se aumenta el peso en ¼ de millón de veces! Cada gotita minúscula de líquido, que se encuentre en este aparato, cuyo peso normal sea de 1 miligramo, se transformará en un cuerpo que pesa ¼ de kilogramo.

También es cierto, que estos líquidos se pueden colocar en la centrífuga para encontrar sus propiedades, aumentando no sólo su peso, sino también su masa.

2. Una atracción no muy segura

A mí me presentaron alguna vez, un proyecto referente una de las nuevas atracciones de uno de los parques de Moscú, para que diera mi opinión sobre ella. El proyecto mostraba una especie de "poste gigante" en cuyo extremo superior iban unidos unos cables (o varillas) a las que iban sujetas en el otro extremo, unas sillas en forma de pequeños aeroplanos. Al girar los cables rápidamente, los aeroplanos con los viajeros ubicados en sus asientos, debían quedar suspendidos en el aire y

[2] *Ultracentrifuga* o *centrífuga*, es una máquina que pone a girar a alta velocidad, una muestra de alguna sustancia para separar sus componentes, de acuerdo a la densidad de cada uno de ellos, mediante la fuerza centrífuga.
Se emplean las *centrífugas* en diversas aplicaciones: Para sedimentar, separando el plasma del suero de la sangre. Para determinar el grupo sanguíneo mediante una toma de muestra capilar. Para elaborar aceite de oliva, separando el aceite del agua, de la pulpa y del hueso de la aceituna. Para medir el grado de grasa o crema de la leche. *(N. del E.)*

llevados hacia arriba. Los constructores habían diseñado este aparato de tal modo, que los cables o varillas se extendían horizontalmente.

Tuve que hacerlos desistir del proyecto, porque creían firmemente que los ocupantes de este aparato no corrían ningún riesgo. Realmente estaban equivocados debido a que los cables eran demasiado largos y se extendían demasiado al alcanzar la posición horizontal.

Partiendo del hecho de que el organismo humano no sufre daño alguno mientras no alcance una aceleración superior al triple de la gravedad, se puede calcular fácilmente la elevación de los cables del mencionado aparato.

Echamos mano a la Fig. 36, del artículo anterior. Queremos que la aceleración no aumente más de tres veces el peso *P*, hasta alcanzar el peso *Q*, lo que quiere decir que

$$Q / P = 3$$

pero si

$$Q / P = 1 / \cos(\alpha)$$

se deduce que

$$\frac{1}{\cos(\alpha)} = 3 \Rightarrow \cos(\alpha) = 1/3 = 0{,}33$$

y de ahí resulta que

$$\alpha \approx 71^{\circ}$$

Esto quiere decir que los cables no se deben inclinar más de 71 grados respecto a la posición normal (cuando están en reposo, o sea verticalmente), y por lo tanto, dichos cables no se puede acercar a la posición horizontal menos de 19 grados.

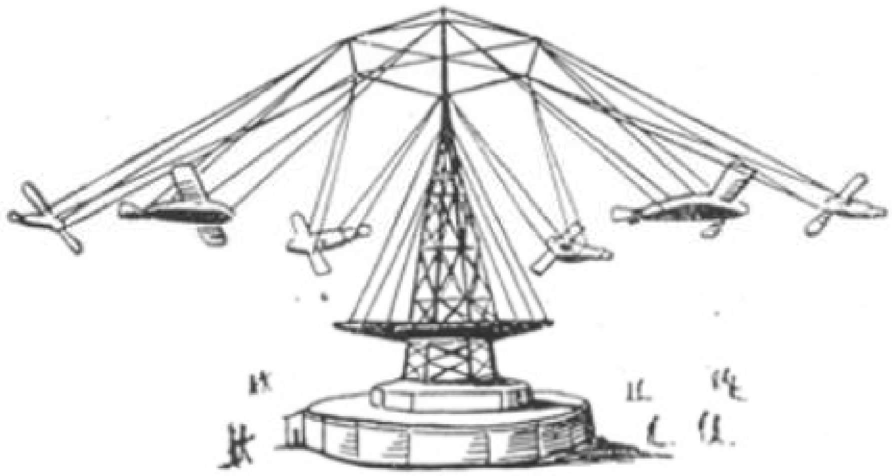


Figura 37. Atracción para dar vueltas en aeroplano.

La figura 37 muestra estas atracciones, existentes en algunas ciudades de América. Se observa que la pendiente de los cables no alcanza el límite antes indicado.

3. En la curva de la vía del ferrocarril

"Sentado en un vagón de tren que recorría una curva, cuenta el físico E. Mach,[3] observé, que súbitamente los pueblos, las casas y las chimeneas de las fábricas situadas cerca de la vía, adoptaron una posición inclinada."

Muchos viajeros experimentan con bastante frecuencia un fenómeno similar en los trenes rápidos, que marchan hacia el Occidente, porque en estos trayectos no resulta extraña una velocidad de 100 km/h.

Esto no se debe a que los rieles exteriores, en las curvas, suban más que los interiores, y que mientras dura la curva, el vagón marcha por lo tanto, en una posición ligeramente inclinada. Si nos inclinamos fuera de la ventanilla y observamos los alrededores y no dentro del tren, esta ilusión desaparece.

Después de todo lo dicho en los artículos anteriores, apenas es necesario indicar las verdaderas causas de este fenómeno. El lector notará que la perpendicular al vagón, indica la inclinación de la posición, en el preciso instante en el que el tren toma la curva. Esta nueva línea vertical substituye la antigua para el viajero; la que anteriormente era perpendicular, ahora resulta inclinada para el viajero.

[3] *Ernst Mach* (1.838 – 1.916). Físico y filósofo austríaco. Catedrático de matemáticas en la Universidad de Graz y catedrático de física experimental en la Universidad de Praga. *(N. del E.)*

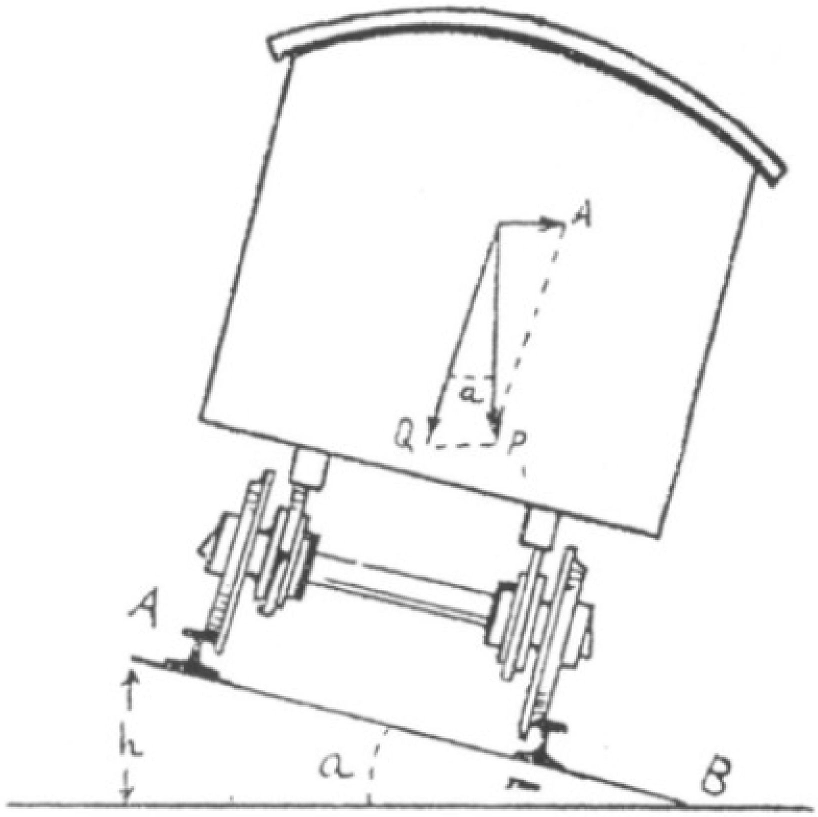


Figura 38. ¿Qué fuerzas actúan sobre el vagón que avanza por una curva? Inclinación de los peraltes del ferrocarril

La nueva orientación de la línea perpendicular[4] se calcula fácilmente mediante la Fig. 38. En ella, la letra *P* indica la fuerza de gravedad, y la letra *R* la fuerza centrífuga. Resulta así la orientación *Q*, que cambia la fuerza de gravedad para el viajero, todos los cuerpos ubicados dentro del vagón, se orientarán en esta dirección. El tamaño del ángulo α, de la inclinación de la dirección perpendicular, se define mediante la ecuación:

$$tg\ (\alpha) = R / P$$

[4] Así debido a que la superficie terrestre gira sobre su eje con cierta inclinación, la perpendicular en "tierra firme" no se orienta estrictamente hacia el centro de nuestro planeta, sino se desvía de éste, en un ángulo no muy grande (en la latitud de Leningrado este ángulo es de 4'; en el paralelo 45, este ángulo tiene un tamaño mucho mayor; en los polos y en el ecuador no existe inclinación).

Y como la fuerza *R* es proporcional a v^2/r, donde *v* es la velocidad del tren, y *r* el radio de la curva; y la fuerza *P* es proporcional a la aceleración de la gravedad *g*, entonces

$$tg(\alpha) = \frac{v^2}{r} \div g = \frac{v^2}{rg}$$

Siendo la velocidad del tren 18 m/seg (65 km/h) y el radio de la curva = 600 metros, entonces se tiene que

$$tg(\alpha) = \frac{18^2}{600 \text{ x } 9{,}8} = 0{,}055$$

y de ahí resulta que

$$\alpha \approx 3{,}15º$$

Esta orientación perpendicular en apariencia,[5] resulta para el observador verdaderamente perpendicular; por esta razón, el observador verá inclinados 3º, los fenómenos que realmente son perpendiculares. En la línea del ferrocarril, cerca de la montaña de San Gotardo, el camino está lleno de innumerables tramos curvos, y el pasajero ve con una inclinación de 10º, toda la naturaleza y los alrededores que son perpendiculares.

Para que el vagón sobre la curva pueda quedarse en equilibrio, hace falta que los rieles exteriores del camino curvo sean más altos que los interiores, elevándose por encima de éstos a una altura que corresponda a las nuevas condiciones de la línea horizontal. Por ejemplo, para el caso de la curva que estamos analizando, los rieles exteriores *A* (Fig. 38) se deben levantar a una tal altura *h* para que

$$h \,/\, AB = \text{sen}(\alpha)$$

[5] La expresión correcta para el observador actual es: "temporalmente perpendicular".

La anchura del carro, *AB*, es aproximadamente igual a 1,5 metros; sen(α) = sin (3º) = 0,052. Lo que quiere decir:

$$h = AB \operatorname{sen}(\alpha) = 1.500 \times 0{,}052 \approx 80 \text{ milímetros}$$

Los rieles exteriores deben elevar 80 milímetros por encima de los interiores. Es fácil de comprender que esta elevación corresponde únicamente a determinada velocidad, pero no es posible cambiar esta velocidad del tren; al construir las curvas debe tenerse en cuenta el rango de la velocidad del movimiento.

4. Vías no aptas para los peatones

Encontrándome en un tramo curvo de la línea ferroviaria, apenas he podido observar que los rieles exteriores se encuentran ligeramente más altos que los interiores. Otra cosa es la vía para las bicicletas en el velódromo: en estos casos la curva tiene casi siempre tiene un radio mucho menor, sin embargo, la velocidad es bastante elevada, y el ángulo de inclinación es más pronunciado. Así por ejemplo, si se tiene una velocidad de 72 km/h (20 m/seg) y un radio de 100 metros, el ángulo de inclinación se define mediante la ecuación:

$$tg(\alpha) = \frac{v^2}{rg} = \frac{400}{100 \text{ x } 9{,}8} = 0{,}4$$

de acá resulta que

$$\alpha = 22º$$

En una vía como ésta, el peatón no se puede sostener. Mientras que el ciclista solo se puede sentir completamente seguro en dicha vía. ¡Paradoja interesante de la gravedad! De esta forma se han construido también, vías especiales para carreras de automóviles.

En los circos se suele ver con frecuencia montajes que resultan aún más paradójicos a primera vista, y que, sin embargo, están acordes a las leyes de la mecánica. El ciclista de circo se mueve con una velocidad de 10 m/seg por segundo, dentro de un embudo (una cesta) cuyo radio es a veces inferior á 5 metros; en este caso la inclinación de las paredes del embudo deben ser muy curvas:

$$tg(\alpha) = \frac{10^2}{5 \text{ x } 9{,}8} = 2$$

de allí resulta que

$$\alpha = 63º$$

A los espectadores les parece que el artista logra realizar tales hazañas en condiciones naturales, gracias a su extraordinaria habilidad y el gran arte adquirido, pero en realidad no se trata de condiciones extraordinarias, sino de las más apropiadas a la velocidad dada.

5. Tierra que se levanta

Quien ha tenido la ocasión de ver la curva que efectúa el avión, al describir un lazo horizontal (mientras realiza "acrobacias") piensa en las estrictas precauciones que debe tomar el piloto para no salir disparado de su aparato. El aviador realmente no percibe los lazos que realiza el avión, sino que siente como si su máquina se moviera en el aire horizontalmente. Sin embargo, siente otras cosas: primero, percibe el aumento de la gravedad; segundo, ve como se levantan todos los lugares que observa.

A modo de ejemplo, calculemos el ángulo al que se puede elevar la superficie horizontal de la tierra para el aviador que efectúa los giros, y la altura que debe alcanzar de acuerdo al aumento de su gravedad.

De los datos que existen, podemos deducir que el aviador describe círculos (lazos) de 140 metros de diámetro a una velocidad de 216 km/h (60 m/seg) (Fig. 39). Podemos hallar el ángulo de inclinación, α, a partir de la ecuación:

$$tg(\alpha) = \frac{v^2}{rg} = \frac{60^2}{70 \text{ x } 9{,}8} = 5{,}2$$

de allí resulta que α = 79º. Teóricamente no solo se "levanta" la tierra para el aviador, sino ésta le parece casi "vertical", porque ella forma un ángulo de 11º con la vertical.

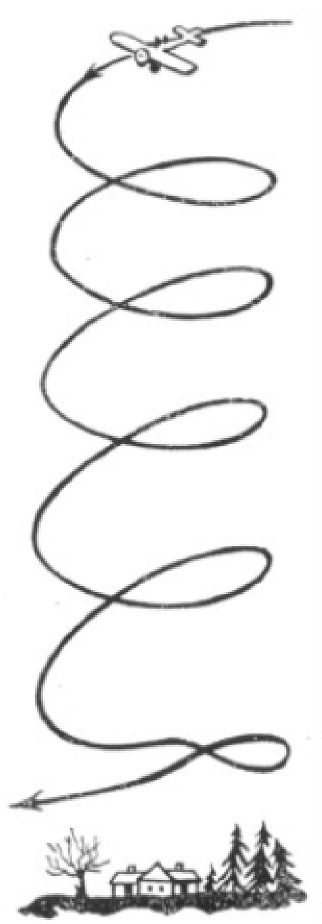


Figura 39. La tierra parece levantarse cuando el aviador "efectúa el rizo".

Sin embargo, en la práctica, debido probablemente a causas fisiológicas, la tierra parece estar inclinada 69º y no 70º (véase Fig. 40).

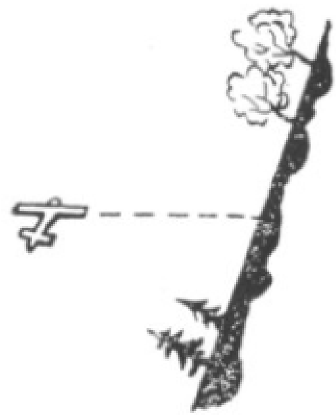


Figura 40. Lo que ve el aviador de la Figura 39 durante el descenso.

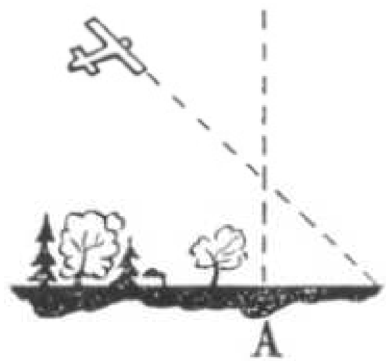


Figura 41. El aviador vuela con un radio de inclinación de 520 metros y una velocidad de 190 km/h

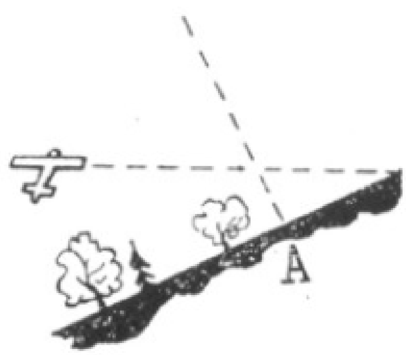


Figura 42. Lo que le sucede al aviador de la Figura 41

El aumento de gravedad en relación a su equilibrio natural (Fig. 38), es igual al coseno del ángulo entre la vertical y la dirección del plano en el que se halla el avión, es decir, que:

$$\cos(\alpha) = \frac{g}{a}$$

De donde:

$$a = \frac{g}{cos(\alpha)} = \left[\frac{1}{cos(\alpha)}\right]g$$

Este ángulo, según se calculó anteriormente, es

$$\alpha = 79º$$

Por lo tanto, mediante la tabla de funciones trigonométricas encontramos el coseno correspondiente (cos 79º = 0,19) y su inverso es:

$$\frac{1}{cos(\alpha)} = \frac{1}{0,19} = 5,3.$$

Como:

$$a = \frac{g}{cos(\alpha)} = \left[\frac{1}{cos(\alpha)}\right]g$$

Entonces, la aceleración a que se somete el piloto es:

$$a = 5,3\ g \approx 6\ g$$

Siendo, *g*, la gravedad normal.

Esto quiere decir, que el aviador que ejecuta tales virajes, está presionado contra el asiento, 6 veces más que si viajara en línea recta, es decir, que siente una gravedad 6 veces mayor.

Este aumento de peso puede ser fatal para el aviador. Se conocen casos en los cuales el aviador que efectúa "tirabuzones" (caídas circulares en espiral, de radio muy pequeño) con su aparato, no es capaz de levantarse de su asiento ni de efectuar un simple movimiento con la mano. ¡El cálculo indica, que el cuerpo es sometido a una gravedad 8 veces mayor! El aviador sólo puede evitar el desastre, concentrando todas sus fuerzas.

6. ¿Por qué se curvan los ríos?

Desde hace mucho se conoce la tendencia natural de los ríos a curvarse como una serpiente que se arrastra por el suelo. No debe pensarse que las desviaciones de los ríos siempre están condicionadas por los relieves del terreno.

El paisaje puede ser completamente llano y de todas maneras se desvía el río. Esto puede resultar bastante enigmático: lo más lógico es que en tales lugares los ríos tomen una dirección recta.

Una observación más detallada revela cosas aún más sorprendentes: la dirección recta para los ríos que corren por paisajes llanos, resulta ser más estable y por esto, también la más probable. Sin embargo, un río solo conserva su curso en línea recta, en condiciones ideales, que nunca se dan en la realidad.

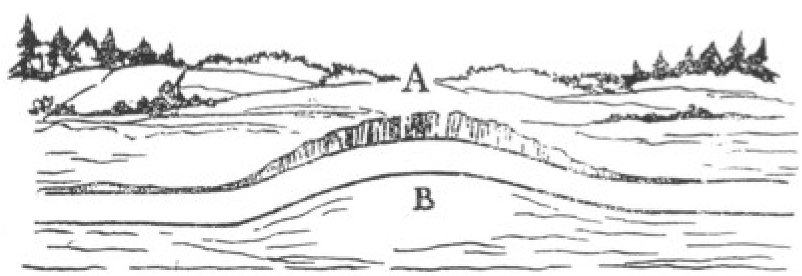


Figura 43. La pequeña desviación del río tiende a crecer constantemente.

Se pueden hallar ríos que corren en línea recta sobre un suelo bastante homogéneo. Pero podemos demostrar que dicha corriente no puede durar mucho. Por causas eventuales, por ejemplo, la falta de homogeneidad del suelo, la variación de la corriente del río, hacen que se curve en cualquier lugar. ¿Y qué sucede después? ¿Corrige el río su curso? No, aumenta la desviación. En el lugar en el que se curva el río (Fig. 43), debido al efecto centrífugo, el agua es presionada contra la orilla cóncava *A*, y socava esta ribera; y al mismo tiempo, el agua retrocede de la orilla convexa *B*. Para rectificar el curso del río es necesario el proceso contrario: la presión contra la orilla convexa y el retroceso de la orilla cóncava. Al socavar el río la orilla, crece su concavidad, y junto con esta crece también la fuerza centrífuga, que a su vez, refuerza la socavación de la orilla cóncava.

Como puede verse, esta fuerza es suficiente para formar una curva, aún en los pliegues más insignificantes, y dicha curva va aumentando constantemente.

Poco a poco, el nivel del río en la orilla cóncava contra la cual se presiona el agua, va subiendo más que en el lado convexo, (el lector comprende fácilmente la razón de este resultado, atendiendo a lo expuesto en los artículos anteriores de este capítulo) por esto en el fondo de los ríos se crea una corriente de agua en dirección transversal, de la orilla cóncava hacia la orilla convexa, pero en la superficie del río parece presentarse lo contrario: un flujo de agua de la orilla convexa hacia la orilla cóncava. La corriente transversal transfiere residuos arrancados por el río, de la orilla cóncava a la convexa, y allí se asientan. Por esto la orilla convexa aumenta su curvatura y la cóncava la reduce.

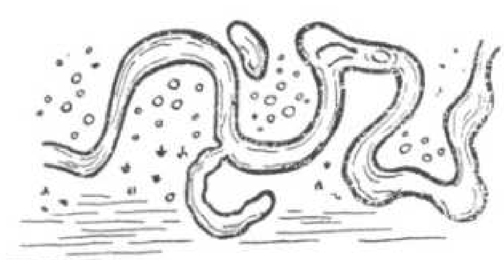
Figura 44. Aumento constante de la sinuosidad del lecho de los ríos.

Y como son casi inevitables las circunstancias accidentales, que conducen a los ríos a efectuar sus primeras desviaciones, también es irremediable la formación de las curvaturas de los ríos, en constante crecimiento, y luego de grandes lapsos de tiempo, la formación de la sinuosidad característica de los ríos. Estos pliegues se denominan “meandros”, del río Meandro (de la parte occidental de la Asia Menor), cuya corriente sinuosa llamó siempre la atención de los pobladores de la Antigüedad, transformando el nombre del río en un apelativo.

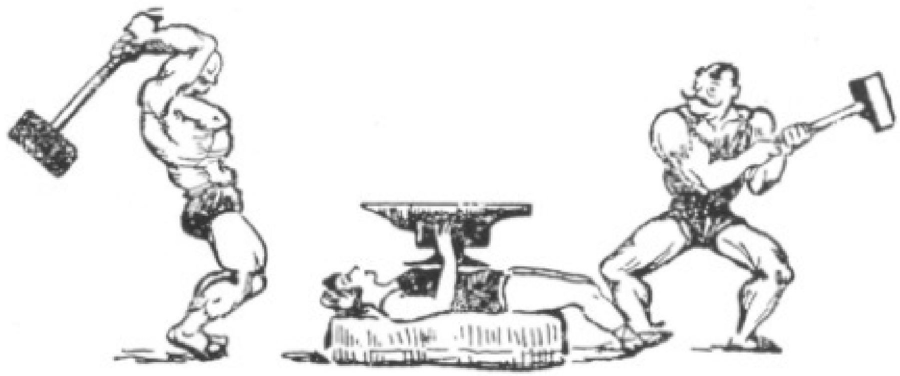
Es interesante seguir la variación de las desviaciones de los ríos. El cambio sucesivo de apariencia del lecho de los ríos se expresa de un modo sencillo en las Figs. 44 *a* - *h*. En la Fig. 44 *a*, tenemos frente a nosotros un río curvado, en la siguiente Fig. 44 *b*, la corriente logra socavar la orilla cóncava y hay algunos indicios de inclinación de la orilla convexa. En la Fig. 44 c, el fondo del río tiene ya una mayor anchura, y en la Fig. 44 *d*, el lecho del río se convierte en un ancho valle, en el cual las aguas del río ocupan únicamente una parte muy pequeña. En las Figs. 44 *e, f* y *g*, el valle del río alcanza un desarrollo tan amplio, que parece casi un nudo. Finalmente, en la Fig. 44 *h*, se ve cómo taladra el río su camino alrededor de sus tramos sinuosos y cava allí su lecho, dejando raída la parte cóncava del valle como si fuera un lecho viejo, llena de agua estancada en las partes más apartadas del lecho; a este espacio se le conoce como “brazo muerto”.

El lector mismo habrá deducido por qué razón el río corre de manera diferente en su valle ampliamente elaborado, y a lo largo de una de sus riberas, sino que se lanza todo el tiempo de un borde hacia el otro, del cóncavo hacia el convexo y viceversa.[6]

Así rige la mecánica los destinos geológicos de los ríos. El esbozo que hemos hecho, se efectúa de forma natural, en grandes espacios de tiempo, que abarcan miles de años. Sin embargo, en cada primavera se puede observar un fenómeno a escala, semejante al anteriormente mencionado, si se observan los pequeños riachuelos del agua de la nieve derretida que corren sobre la nieve que aún permanece endurecida.



[6] No hemos dicho aquí absolutamente nada sobre la acción del movimiento de rotación de la Tierra, que hace que los ríos del hemisferio norte corran con mayor fuerza sus riberas derechas, y los del hemisferio sur, sus riberas izquierdas. Al respecto véase mi libro “Astronomía Recreativa”.



CAPÍTULO 6
EL CHOQUE

Contenido:

1. En busca de lo más sencillo

Aquella parte de la Mecánica que trata sobre las leyes del choque de los cuerpos, no goza de la simpatía general de los alumnos. Se asimila lentamente y se olvida rápidamente quedando de ella un mal recuerdo, como queda del montón de fórmulas difíciles. A pesar de esto, el choque merece gran atención, pues hace cincuenta años la colisión de los cuerpos era considerada como el único fenómeno comprensible entre todos los fenómenos físicos que suceden en el mundo; y ha sido reconocido como el único fenómeno que no necesita aclaración, así como se intentaron explicar los demás fenómenos de la naturaleza, a partir del choque de dos cuerpos.

Incluso Cuvier,[1] uno de los más destacados naturalistas del siglo XIX, escribió: "Exceptuando el choque, no podemos formarnos una idea clara sobre las relaciones entre causa y efecto".

Los fenómenos solo se consideraban explicables si se podían deducir sus causas a partir de la colisión de las moléculas.

El intento por explicar el mundo, partiendo de su comienzo no ha sido coronado por el éxito; gran cantidad de fenómenos eléctricos, ópticos y gravitatorios no resiste tal explicación. Sin duda, todavía hoy, el choque de los cuerpos juega un papel importante en la explicación de los fenómenos de la naturaleza. Recordamos la teoría cinética de los gases, que explica su extenso círculo de fenómenos como un movimiento desordenado de múltiples moléculas que chocan continuamente. A más de esto nos encontramos, en la vida cotidiana, a cada paso, con cuerpos que chocan. No podemos seguir adelante sin conocer esta sección de la Mecánica.

2. La mecánica del choque

Entender la mecánica del choque de los cuerpos, significa poder prever cuál será la velocidad de los cuerpos que chocan, después de su encuentro. Dicha velocidad depende de la forma en que se precipite un cuerpo sobre el otro: sin rebote (choque inelástico) o con rebote (choque elástico).

En un choque inelástico, los cuerpos que chocan adquieren una velocidad uniforme después del choque, la cual se comporta de igual manera que la mezcla adecuada.

A modo de ejemplo, se mezclan 3 kg de café á 8 rublos el kilo, con 2 kg de café á 10 rublos el kilo, entonces el precio de la mezcla es igual a:

$$\frac{3\text{ kg x }8\text{ rublos/kg }+\text{ }2\text{ kg x }10\text{ rublos/kg}}{3\text{ kg }+\text{ }2\text{ kg}}=8{,}8\text{ rublos}$$

Lo mismo sucede cuando un cuerpo inelástico, que posee una masa de 3 kilogramos y una velocidad de 8 cm/seg choca con otro cuerpo inelástico cuya masa es de 2

[1] *Georges Léopold Chrétien Frédéric Dagobert Cuvier, barón de Cuvier*, (1.769 –1.832). Naturalista francés. Primer gran promotor de la anatomía comparada y de la paleontología. Ocupó diferentes puestos de importancia en la educación nacional francesa en la época de Napoleón y tras la restauración de los Borbones. Nombrado profesor de anatomía comparada del Museo Nacional de Historia Natural de Francia, en París. *(N. del E.)*

kilogramos y cuya velocidad es de 10 cm/seg, de ahí resulta que la velocidad final *x* de cada cuerpo es:

$$x = \frac{3\text{ kg x }8\text{ cm/seg }+\text{ }2\text{ kg x }10\text{ cm/seg}}{3\text{ kg }+\text{ }2\text{ kg}} = 8{,}8\text{ cm/seg}$$

En general, cuando chocan dos cuerpos inelásticos, cuya masas son m_1 y m_2, y cuyas velocidades son v_1 y v_2, la velocidad final, x, después del choque es igual a

$$x = \frac{m_1v_1 + m_2v_2}{m_1 + m_2}$$

Si consideramos positivo el sentido de la velocidad v_1, entonces el signo "+", delante de la velocidad x, indica que el cuerpo, después del choque, se mueve en el mismo sentido que la velocidad v_1; el signo "-", indica que se mueve en sentido opuesto.

Esto es todo lo que hay que saber sobre los cuerpos inelásticos. El choque de los cuerpos elásticos se efectúa de modo más complicado: al chocar, tales cuerpos se comprimen en el momento del choque (igual que los cuerpos inelásticos), pero además de ello, se ensanchan después del choque, volviendo otra vez a su forma primitiva. En esta segunda fase, los cuerpos pierden velocidad, tanto como perdieron en la primera fase; los cuerpos que ganan velocidad en la primera fase, ganarán velocidad del mismo modo, en la segunda fase. La doble pérdida de velocidad por parte de los cuerpos más veloces y la doble recuperación de ella por parte de los cuerpos menos veloces, es la principal característica a tener en cuenta en el choque entre cuerpos elásticos. Las demás características surgen de simples transformaciones matemáticas. Suponemos que la velocidad del cuerpo más rápido es v_1 y la velocidad del cuerpo más lento es v_2, y sus respectivas masas son m_1 y m_2. Si los cuerpos son inelásticos, después del choque cada uno de ellos se mueve con una velocidad

$$x = \frac{m_1 v_1 + m_2 v_2}{m_1 + m_2}$$

La velocidad perdida por el primer cuerpo será: v_1 - x; la velocidad ganada por el segundo, será: $x - v_2$. Si los cuerpos son elásticos, como bien sabemos, se duplica tanto la velocidad perdida como la velocidad ganada, es decir, que son iguales á 2 (v_1 - x) y á 2 (x - v_2), lo que quiere decir que las velocidades definitivas, y y z, después del choque de los cuerpos elásticos son:

$$y = v_1 - 2(v_1 - x) = 2x - v_1$$

$$z = v_2 - 2(v_2 - x) = 2x - v_2$$

Solamente hace falta sustituir en estas fórmulas el lugar de x por su valor real (véase más arriba).

Hemos observado dos casos de choques extremos: de cuerpos completamente inelásticos y de cuerpos completamente elásticos. No obstante, también son posibles los casos intermedios: cuando se precipitan cuerpos no completamente elásticos, es decir, cuerpos que después de la primera fase del choque no recuperan totalmente su forma.

Más tarde volveremos a tratar estos casos; por lo pronto basta con lo ahora expuesto.

Del choque elástico podemos concluir que: los cuerpos se separan después del choque con la misma velocidad con la que se acercaron al punto choque. Esto se deriva de un cálculo bastante sencillo. La velocidad de acercamiento de los cuerpos es igual a

$$v_1 - v_2$$

la velocidad de separación de los cuerpos, después del choque es igual a

$$z - y$$

Colocando en lugar de $z - y$, sus respectivos valores, tenemos que

$$z - y = 2x - v_2 - (2x - v_1) = v_1 - v_2$$

Esta característica no sólo es importante porque hace claridad acerca del choque entre cuerpos elásticos, sino también en relación a otros problemas. Al desarrollar la fórmula hemos hablado sobre los cuerpos que "chocan" y los que "son chocados", los que "alcanzan" y los que "son alcanzados" en relación a su movimiento; naturalmente esto sólo se refiere al movimiento de otros cuerpos que no participan en los movimientos. Sin embargo, en el primer capítulo de nuestro libro (recordemos el experimento de los dos huevos), se indicó que no existen diferencias entre los cuerpos que asestan el golpe y los que son golpeados: se puede cambiar su papel completamente, sin que el fenómeno presente cambios. ¿Será cierto esto en los casos observados? ¿Si se cambia el papel de los cuerpos, no se obtendrán otros resultados a partir de la fórmula antes dada?

Fácilmente puede verse que un cambio como éste no varía en nada el resultado obtenido de la fórmula anterior. En ambos casos, la velocidad resultante antes del choque es constante. Por lo tanto, tampoco cambia la velocidad resultante de los cuerpos que se separan, después del choque

$$(z - y = v_1 - v_2)$$

En una palabra, el movimiento de los cuerpos permanece igual.

Seguidamente realizaremos algunos cálculos para ilustrar el choque de dos cuerpos completamente elásticos. Si chocan dos bolas de acero, cada una de unos 7,5 centímetros de diámetro (es decir, del tamaño de una bola de billar), con una velocidad de 1 m/seg, se comprimen la una contra la otra con una fuerza de 1.500 kilogramos, pero si chocan con una velocidad de 2 m/seg, la fuerza de compresión es de 3.500 kilogramos. El radio del círculo que forman las bolas al acercarse, es de 1,2 milímetros en el primer caso y de 1,6 milímetros en el segundo caso. La duración del choque en ambos casos es cercano a los 1/5.000 segundos (0,0002 seg). El tiempo tan corto del choque se debe a que las bolas no se destruyen bajo la enorme presión (15 á 20 toneladas/cm^2).

Solo se presenta una duración tan pequeña del choque cuando las bolas son de un tamaño muy pequeño. Para unas bolas de acero del tamaño de un planeta (de radio = 10.000 kilómetros) que se acercan con una velocidad de 1 cm/seg, el tiempo del choque debe durar 40 horas. ¡El círculo que forman al acercarse tiene un radio de 12,5 kilómetros y la fuerza con la que se presionan una contra otra es cercana a los 400 millones de toneladas!

3. Aprende de tu pelota

Las fórmulas del choque de los cuerpos, con las cuales nos hemos familiarizado en los capítulos anteriores, tienen poca aplicación en la práctica. Es muy limitado el número de cuerpos que se pueden considerar "completamente inelásticos" o "completamente elásticos". La gran mayoría de los cuerpos no pertenece ni a una ni a otra categoría: son "elásticos, sin serlo por completo". Entre ellos se destaca la pelota. No debe sorprendernos el sarcasmo de los antiguos fabulistas que preguntaban ¿qué cosa es la pelota? ¿Es elástica o no, desde el punto de vista de la mecánica?

Hay un método simple para comprobar la elasticidad de una pelota: dejarla caer desde una gran altura hacia un suelo duro. La pelota completamente elástica deberá saltar otra vez hasta la misma altura desde la que fue lanzada.

Esto se deduce de la fórmula del choque de cuerpos elásticos:

$$y = 2x - v_1 = \frac{2(m_1 v_1 + m_2 v_2)}{m_1 + m_2}$$

Añadiendo además que cuando la pelota que se estrella contra el suelo inmóvil, se puede considerar infinitamente grande la masa m_2 del suelo, y sin embargo su velocidad igual á 0: $m_2 = \infty$, $v_2 = 0$. Hasta la sustitución de estos valores en las fórmulas anteriores que deben ser reformadas, el numerador y denominador se divide por m_2:

$$y = \frac{2\left(\frac{m_1}{m_2}v_1 + v_2\right)}{\frac{m_1}{m_2} + 1} - v_1$$

Después de la sustitución obtenemos:

$$y = \frac{2\left(\frac{m_1}{\infty}v_1 + v_2\right)}{\frac{m_1}{\infty} + 1} - v_1$$

Como

$$\frac{m_1}{\infty} = 0$$

la división es igual a cero y la fórmula presenta el siguiente aspecto:

$$y = -v_1$$

Es decir, que la pelota debe rebotar desde el suelo con la misma velocidad con la que cayó sobre él. Si cae de una altura *H*, el cuerpo adquiere una velocidad

$$v = \sqrt{2gH},$$

De ahí resulta que

$$H = \frac{v^2}{2g}$$

Arrojándola otra vez perpendicularmente hacia arriba con la velocidad *v*, el cuerpo alcanzaría la altura

$$h = \frac{v^2}{2g}$$

lo cual significa que $h = H$, pues la pelota debe alcanzar la misma altura desde la que cayó.

La pelota inelástica no rebota en ningún caso (lo cual se comprueba fácilmente a partir de las fórmulas dadas).

¿Cómo se comporta la pelota que no es completamente elástica? Para responder esta pregunta examinemos el choque elástico. La pelota llega hasta el suelo; en el punto de contacto se hunde y las fuerzas que la empujan disminuyen su velocidad. Hasta dicho momento la pelota se comporta como un cuerpo inelástico; es decir, que su velocidad es en este momento igual a x, y la pérdida de velocidad es igual a:

$$v_1 - x.$$

Pero en el lugar en que se hunde, la pelota es empujada hacia arriba rápidamente, como es de esperar, este proceso comprime la pelota contra el suelo, lo que le impide su empuje hacia arriba, produciéndose así una fuerza que obra sobre la pelota y le disminuye su velocidad. Si la pelota, en dicho instante, recupera completamente su forma anterior, es decir, que invierte el recorrido de la etapa del cambio de forma por la que pasó en el momento de la caída, esta nueva pérdida de velocidad debe ser igual a la anterior, es decir, $v_1 - x$, y de ahí resulta que la velocidad de una pelota completamente elástica se disminuye en $2 (v_1 - x)$ y se equilibra en

$$v_1 - 2(v_1 - x) = 2x - v_1$$

Si decimos que la pelota "no es completamente elástica" nos referimos a que ella no recupera completamente su forma después de su transformación bajo la influencia de las fuerzas exteriores. En la recuperación de su forma colaboran todas las fuerzas, menos las que transformaron dicha forma, y referente a esto, la velocidad perdida en el período de recuperación es menor que la velocidad final; es diferente a $v_1 - x$, pues le falta una parte denominada *e* ("coeficiente de recuperación"). Así que, mientras la velocidad perdida por el choque de cuerpos elásticos en el primer período es igual $v_1 - x$, en el segundo es igual a $e(v_1 - x)$. La pérdida general es igual a $(1 + e)(v_1 - x)$, y la velocidad *y*, que después del choque, es igual a

$$y = v_1 - (1 + e)(v_1 - x) = x(1 + e) - ev_1$$

La velocidad *z*, del cuerpo con el cual se choca (en este caso, el suelo), que empuja a la pelota, según la ley de acción y reacción, debe ser igual, como fácilmente se puede calcular, a:

$$z = x(1 + e) - ev_2$$

La diferencia entre $z - y$, de ambas velocidades, es igual a $ev_1 - ev_2 = e(v_1 - v_2)$, de allí resulta que el coeficiente de la recuperación es

$$e = \frac{z - y}{v_1 - v_2}$$

Para la pelota que se precipita contra el suelo inmóvil,

$$z = 0$$
$$v_2 = 0$$

Por consiguiente,

$$e = y / v_1$$

Pero *y*, velocidad de la pelota que salta, es igual a $\sqrt{2gh}$, donde *h* es la altura hacia la cual salta la pelota, $v_1 = \sqrt{2gH}$, donde *H* es la altura desde la cual cayó la pelota. Esto significa que:

$$e = \sqrt{\frac{2gh}{2gH}} = \sqrt{\frac{h}{H}}$$

Y así hemos logrado la forma de determinar el "coeficiente de recuperación", *e* de la pelota, característico para esta clase de cuerpos y que los distingue de los totalmente elásticos: es decir, que hace falta medir la altura desde la cual se han dejado caer y la altura hacia la cual saltan, o sea, el coeficiente buscado que se encuentra extrayendo la raíz cuadrada de la relación entre estas dos cantidades.

Según las normas deportivas, una buena pelota de tenis, en caso de caer desde una altura de 250 centímetros, debe saltar hasta una altura entre 125 y 152 centímetros. Esto significa que el coeficiente de recuperación de una pelota de tenis debe encontrarse dentro de los límites siguientes:

$$\text{de } \sqrt{\frac{127}{250}} \text{ a } \sqrt{\frac{152}{250}}$$

es decir, de 0,71 á 0,78.

Fijamos pues, 0,75 como cantidad media; en otras palabras, la pelota es "elástica en un 75%" y este resultado es valioso para un tenista.

De la fórmula anterior se obtiene que:

$$h = H \text{ x } e^2$$

Si el tenista lanza la bola contra el piso desde una altura de 140 cm, rebotará hasta una altura $h = 250 \times (0{,}75)^2 \approx 140$ cm

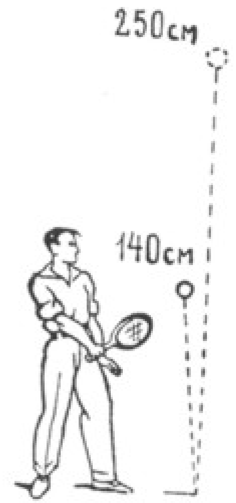


Figura 45. Salto de una buena pelota de tenis

Primer problema: ¿Hasta dónde salta la pelota la segunda vez, la tercera y las siguientes, cuando se deja caer desde una altura *H*?

Como bien sabemos, la primera vez, la pelota salta hacia una altura determinada según la siguiente fórmula:

$$e = \sqrt{\frac{h}{H}}$$

Para *e* = 0,75 y *H* = 250 centímetros, tenemos ahora:

$$\sqrt{\frac{h}{250}} = 0{,}75$$

de aquí resulta *h* = 140 centímetros.

La segunda vez, es decir, después de la caída desde la altura *h* = 140 cm, la pelota salta hacia la altura h_1, por lo tanto,

$$0{,}75 = \sqrt{\frac{h_1}{140}}$$

de ahí resulta que h_1 = 78 centímetros.

La altura h_2 del tercer salto de la pelota la encontramos de la ecuación

$$0{,}75 = \sqrt{\frac{h_2}{78}}$$

de ahí resulta que h_2 = 44 cm.

En general, la altura h_n, del n-ésimo salto será:

$$h_n = H \times e^{2n}$$

Los cálculos siguientes se realizan de la misma forma.

Figura 46. ¿A qué altura salta una pelota de tenis lanzada desde la torre Eiffel?

Lanzando una pelota de tenis desde lo alto de la torre de Eiffel (H = 300 m), ésta saltaría la primera vez hasta 168 m, la segunda vez hasta 94 m y así sucesivamente, sin tener en cuenta la resistencia del aire que en este caso debe ser grande y, por lo tanto, afecta la velocidad.

Segundo problema: Si la pelota cae desde una altura H, ¿cuánto tiempo necesita para volver a saltar?

Sabemos que

$$H = \frac{gT^2}{2}$$

$$h = \frac{gt^2}{2}$$

$$h_1 = \frac{gt_1^2}{2}, \ldots \text{etc.}$$

Y de ahí resulta,

$$T = \sqrt{\frac{2H}{g}}$$

$$t = \sqrt{\frac{2h}{g}}$$

$$t_1 = \sqrt{\frac{2h_1}{g}}, \ldots$$

La duración de los saltos es igual a

$$T + 2t + 2t_1 + 2t_2 + \ldots$$

es decir,

$$\sqrt{\frac{2H}{g}} + \sqrt{\frac{2h}{g}} + \sqrt{\frac{2h_1}{g}} + \ldots$$

Después de efectuar algunas transformaciones, fáciles de realizar para el lector que entiende de matemáticas, se logra calcular la suma de los términos de la serie, obteniendo el valor:

$$\sqrt{\frac{2H}{g}}\left(\frac{2}{1-e}-1\right)$$

Asumiendo los datos del primer problema: H = 250 cm, g = 980 cm/seg^2, e = 0,75, tenemos que la duración total del salto de la pelota de tenis es igual a 5 segundos; es decir, que la pelota salta durante 5 segundos.

Si dejamos caer la pelota de lo alto de la torre Eiffel, el salto dura cerca de un minuto (despreciando la resistencia del aire); exactamente 55 segundos; naturalmente que esto es válido sólo en el caso en que la pelota no se estropee durante el choque.

En caso de que la pelota caiga desde unos pocos metros de altura, la velocidad es pequeña, y por tanto, se puede despreciar la resistencia del aire. Se realizó el siguiente experimento: una pelota, cuyo coeficiente de recuperación es 0,76, cayó desde una altura de 250 cm. Despreciando la resistencia del aire, la pelota debía saltar la segunda vez a una altura de 84 cm; en realidad, la pelota alcanzó una altura de 83 centímetros; esto quiere decir que la resistencia del aire casi no afecta el cálculo.

4. En el campo del croquet

Se necesita una pelota de croquet para poner otra pelota en movimiento, choque que en la Mecánica se denomina "directo" o "central". ¿Qué sucede con ambas pelotas después del choque?

Ambas pelotas tienen igual masa. Si ellas fueran completamente inelásticas, su velocidad después del choque sería uniforme, las dos tendrían, en relación a la velocidad, la misma posición de la pelota que asestó el golpe. Esto se deduce de la fórmula

$$x=\frac{m_1v_1+m_2v_2}{m_1+m_2}$$

en la cual $m_1 = m_2$ y $v_2 = 0$.

Si por el contrario, las pelotas fueran completamente elásticas, según el cálculo (conocido por el lector) fácilmente se determinaría que las pelotas cambiarían su velocidad: después del choque, la pelota en movimiento quedaría fija en el lugar, y la pelota que antes estaba inmóvil se movería después del choque con la misma velocidad de la pelota que asestó el golpe. Tal como sucede al chocar las bolas de billar (que son de marfil).

Pero la pelota de croquet no pertenece ni a una clase ni a la otra: no es completamente elástica. Por esto, el resultado del choque no se parece a los casos hasta ahora mencionados. Ambas pelotas siguen en movimiento después del golpe, pero con diferente velocidad: la pelota golpeada queda detrás de la pelota que la golpea. Volvamos a las fórmulas del choque de los cuerpos.

El "coeficiente de la recuperación" (tal como lo denominamos, según se recuerda el lector, en el artículo expuesto anteriormente), es igual a e. En dicho artículo encontramos que las velocidades y y z de ambas pelotas después del choque tienen el siguiente enunciado:

$$y = (1 + e)\, x - ev_1$$

$$z = (1 + e)\, x - ev_2$$

Aquí, como en las fórmulas anteriores,

$$x = \frac{m_1 v_1 + m_2 v_2}{m_1 + m_2}$$

En el caso de la pelota de croquet $m_1 = m_2$ y $v_2 = 0$. Por lo tanto, tenemos la ecuación:

$$x = \frac{v_1}{2}$$

$$y = \frac{v_1}{2}(1 - e)$$

$$z = \frac{v_1}{2}(1 + e)$$

De ahí se deduce fácilmente que

$$y + z = v_1$$

$$z - y = ev_1$$

Ahora podemos pronosticar con exactitud la suerte de las pelotas del croquet que chocan: la velocidad de las pelotas golpeadas se reparte entre ellas de tal modo que la pelota golpeada se mueve más rápido que la que asestó el golpe, siendo el aumento de la velocidad igual a la fracción *e*, en comparación a la velocidad final de la pelota que asestó el golpe.

Veamos un ejemplo. Supongamos que *e* = 0,75. En este caso, la pelota golpeada recibe 7% de la velocidad inicial de la pelota que asestó el golpe, pero esta última, se mueve después del golpe únicamente en 1/8 parte de su velocidad inicial.

5. Sobre la velocidad de la fuerza

Bajo este título encontramos en el "Libro de lectura" de L. N. Tolstoi[2], la conversación siguiente:

"Una vez una máquina (de tren) corría con mucha rapidez por las vías del ferrocarril. En la misma vía, sobre una traviesa, se encontraba un caballo con un pesado carro. Un campesino intentó arrastrar el caballo fuera de la vía, pero el caballo no pudo arrancar el carro porque sus ruedas se habían atrancado. El conductor gritó al maquinista: "Alto", pero el maquinista no le obedeció. Vio que el campesino no podía ni echar el caballo fuera del carro ni ladear el carro y que no

[2] *Lev Nikoláyevich Tolstói* (1828 - 1910). Novelista ruso, considerado como uno de los más grandes escritores de occidente y de la literatura mundial. Sus más famosas obras son Guerra y Paz y Anna Karénina, tenidas como cúspide del realismo. Sus ideas sobre la "no violencia", expresadas en libros como *El Reino de Dios está en Vosotros* tuvieron un profundo impacto en Gandhi y Martin Luther King. *(N. del E.)*

sería posible tampoco parar la máquina de golpe. Por ello, no trató de parar el tren sino que puso la máquina a todo vapor e intentó en todo sentido pasar sobre el carro. El campesino se alejó del carro, y la máquina, arrojó carro y caballo fuera del camino, como si fuera una viruta, pero el tren no se sacudió sino que siguió tranquilamente su marcha. Entonces el maquinista dijo al campesino: “Ahora no hemos matado más que un caballo y destrozado un carro viejo, pero si te hubiera hecho caso nosotros hubiéramos muerto y matado a todos los pasajeros. Debido a la velocidad de la marcha, hemos pasado por encima del carro y no sentimos el choque, pero si hubiéramos pasado con marcha lenta este choque nos habría descarrilado.”

¿Se puede explicar este suceso desde el punto de vista de la mecánica? Aquí se trata del caso de un choque de cuerpos completamente inelásticos, en el cual el cuerpo que recibe el choque (el carro), estaba inmóvil al momento del choque. Si llamamos m1 y v_1 a la masa y la velocidad del tren, y m_2 y v_2 a la masa y la velocidad del carro ($v_2 = 0$), entonces podemos aplicar aquí nuestras fórmulas conocidas:

$$y = (1 + e)\, x - ev_1$$

$$z = (1 + e)\, x - ev_2$$

$$x = \frac{m_1 v_1 + m_2 v_2}{m_1 + m_2}$$

Dividiendo en la última ecuación, numerador y denominador por m_1, obtenemos:

$$x = \frac{v_1 + \frac{m_2}{m_1} v_2}{1 + \frac{m_2}{m_1}}$$

Pero la relación m_2 / m_1 de la masa del carro con la masa del tren es casi nula, igualándola a cero obtenemos que

$$x \approx v_1$$

Esto quiere decir que el tren seguirá su camino después del choque con la velocidad que traía; y los pasajeros no percibirán ningún cambio de velocidad.

Pero ¿qué pasará con el carro? Su velocidad, después del choque $z = (1 + e)\ x = (1 + e)\ v_1$ sobrepasa a la velocidad del tren por ev_1. Cuanto mayor sea la velocidad v_1 del tren hasta el momento del choque, tanto más rápido será apartado el carro después del choque, del tren que le empujó.

En este caso, este es un factor decisivo para evitar la catástrofe que traería inevitablemente tras de sí el roce del carro con el tren; en caso de una energía insuficiente del choque, el carro podría ser un serio obstáculo, si quedara sobre la vía.

Así que, al poner el tren a toda marcha, el maquinista obró del modo correcto; gracias a esto no perdió el equilibrio, y echó al carro fuera de su camino. Vale la pena anotar que el relato de la obra de Tolstoi hace referencia a los trenes de aquella época, los cuales llevaban una marcha relativamente.

6. El hombre yunque

Este número de circo produce siempre una fuerte emoción incluso en un espectador bastante acostumbrado a tales espectáculos. Sobre el tórax del artista, quien se encuentra acostado sobre el piso, se pone un pesado yunque, y dos atletas, golpean el yunque con todas sus fuerzas, con martillos muy pesados.

Uno piensa con asombro ¿cómo puede aguantar un hombre tales golpes sin sufrir daño?

Las leyes del choque de los cuerpos elásticos nos dicen que cuanto más pesado sea el yunque en comparación con el martillo, tanto menor será la velocidad que recibe debido al choque, es decir, que tanto menor es la repercusión recibida.

Recordemos la fórmula de la velocidad de los cuerpos que son golpeados cuando se presenta un choque entre cuerpos elásticos

$$z = 2x - v_2 = \frac{2(m_1v_1 + m_2v_2)}{m_1 + m_2} - v_2$$

Aquí m_1 es la masa del martillo, m_2 es la masa del yunque, v_1 y v_2 son sus respectivas velocidades al momento del choque. Sabemos de antemano, que $v_2 = 0$, porque el yunque permanece inmóvil hasta el momento del choque. Esto significa que nuestra fórmula queda así:

$$z = \frac{2m_1v_1}{m_1 + m_2} = \frac{2v_1\frac{m_1}{m_2}}{\frac{m_1}{m_2} + 1}$$

(hemos dividido el numerador y el denominador por m_2). Si la masa m_2 del yunque tiene un peso muy considerable en comparación con la masa m_1 del martillo, entonces la división m_2/m_1 es muy pequeña y se puede despreciar. Así que la velocidad del yunque después del golpe es:

$$z = 2v_1\frac{m_1}{m_2}$$

es decir, queda compuesta solamente de una fracción muy pequeña de la velocidad v_1 del martillo.[3]

Como el yunque que es más pesado que el martillo, por ejemplo, unas 100 veces más, la velocidad será 50 veces menor que la del martillo:

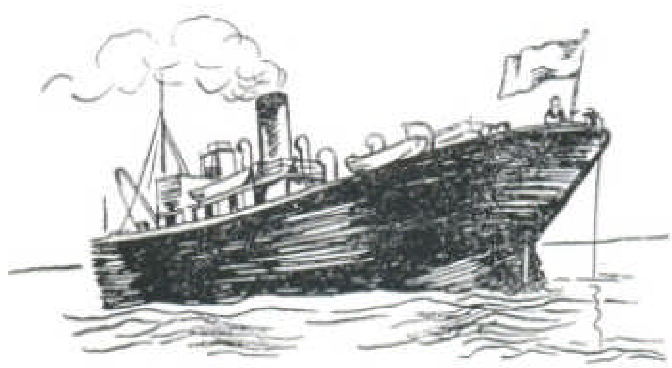
$$z = \frac{2v_1}{100} = \frac{v_1}{50}$$

Cualquier herrero sabe muy bien, por la práctica, que el golpe de un martillo ligero no se transmite hasta el fondo del yunque. Ahora se comprende por qué es más

[3] Hemos supuesto que tanto el martillo como el yunque son cuerpos completamente elásticos. El lector puede deducir que el resultado varía poco si ambos cuerpos no son completamente elásticos.

ventajoso para el artista, que el yunque puesto sobre él sea lo más pesado posible. Todo se reduce a que él sea capaz de soportar el peso del yunque. Esto es posible cuando la base del yunque tiene una forma que se adapte bien al cuerpo apoyándose en un amplio espacio y no haciendo contacto solo con algunos puntos del cuerpo. De este modo de distribuye el yunque sobre una gran superficie y a cada centímetro cuadrado le corresponde una carga pequeña. Entre la base del yunque y el cuerpo del hombre se coloca un cojín blando.

No tiene ningún valor para el artista mentir al público con el peso del yunque pero sí le resulta bien engañar al público con el peso del martillo; posiblemente por esto los martillos de los cirqueros no son tan pesados como parecen. Si el martillo es hueco entonces la fuerza de su golpe no es más débil a los ojos del observador, y sin embargo, la vibración del yunque se reduce proporcionalmente a la disminución de la masa del martillo.



CAPÍTULO 7
ALGO SOBRE LA ESTABILIDAD

Contenido:

1. ¿Cómo se mide la profundidad del océano?

La profundidad media del océano es de unos 4 kilómetros, pero en algunos lugares el fondo se encuentra a una profundidad dos o más veces mayor. La mayor profundidad, como ya hemos mencionado es de 11 kilómetros.[1] Para poder medir

[1] La mayor profundidad del océano es el *Abismo Challenger*. Es el punto más bajo de la superficie rocosa terrestre. Se encuentra en la Fosa de las Islas Marianas. Sus coordenadas son 11°22’N 142°36’E. Las tierras más cercanas a ella son la Isla Fais -que hace parte de las islas Yap conformadas por 4 islas y unos 130 atolones-, á 289 km al Suroeste, y la Isla Guam, 306 km al Noreste.
Fue descubierta en 1.875 por el barco HMS Challenger, de la Marina Real Británica. De ahí su nombre.
La profundidad máxima medida en la Challenger Deep es de 10.923 metros (35.838 pies) bajo el nivel del mar, aunque National Geographic estima dicha profundidad en 11.034 m.
El 23 de enero de 1.960, el batiscafo suizo Trieste, adquirido por la Armada de los Estados Unidos, descendió al fondo oceánico, tripulado por el oceanógrafo Jacques Piccard y el teniente Don Walsh. Jacques Piccard y su padre Auguste Piccard, diseñaron el mencionado sumergible.
En 1.984, un navío oceanográfico japonés estudió el fondo con un sonar y estimó la profundidad del abismo en 10.923 metros.
En 2.009 se produjo un nuevo descenso al abismo, con el Nereus.

tal profundidad es necesario sumergir en el océano un cable que mide más de 10 kilómetros. Pero este cable tiene un peso enorme. ¿No hay peligro de que dicho cable se pueda romper debido a su propio peso?

La pregunta no es ociosa; los cálculos confirman su conveniencia.

Si el peso del cable es *a* (g), el diámetro del cable es *D* (cm), su longitud es *x* (cm), y su densidad es ρ (g/cm^3), entonces:

$$a = \frac{1}{4}\pi D^2 \text{ x } 1.100.000 \text{ x } 8 \approx 6.900.000\ D^2 \text{ gramos}$$

Imaginemos un cable de cobre de 11 kilómetros de longitud. Por lo tanto, este cable tiene una longitud x = 1.100.000 cm, y su diámetro es *D* (en cm). Como un centímetro cúbico de cobre pesa en el agua alrededor de 8 gramos, $\rho = 8$ g/cm^3. Así que todo nuestro cable presenta en el agua, un peso de

$$a = \frac{1}{4}\pi\ D^2\ x\ \rho$$

Si se emplea un cable grueso, por ejemplo de 3 milímetros de diámetro, (D = 0,3 cm.) esto significa un peso de 620.000 gramos, es decir, de 620 kilogramos. ¿Un cable de este grueso puede soportar un peso de 3/5 de tonelada? Dejemos a un lado esta pregunta y dediquemos algunas páginas al problema de las fuerzas que pueden romper cables y las barras.

Una rama de la Mecánica, la llamada "resistencia de materiales", afirma que la fuerza que se requiere para romper un cable o una barra, solo depende de los materiales que la componen y de la fuerza que soporta de acuerdo a su sección transversal. Este último valor se puede calcular fácilmente. Cuantas veces sea mayor el área de la sección, tantas veces hace falta multiplicarla para lograr la fuerza requerida para producir su ruptura. A nivel de laboratorio se han establecido los valores de fuerza requeridos para romper barras de diversos materiales, cada una de las cuales tiene una sección transversal de 1 milímetro. En los informes

(N. del E.)

técnicos se anexa una tabla con los valores de dichas fuerzas, la tabla de la resistencia a la ruptura de diversos materiales. En la Fig. 47 se puede apreciar dicha tabla.

Observando la tabla en mención se puede ver que, para romper un cable de plomo (de 1 mm^2 de sección) se requiere una fuerza de 2 kilogramos; para un cable de cobre, una fuerza de 40 kilogramos y para uno de bronce, una fuerza de 100 kilogramos.

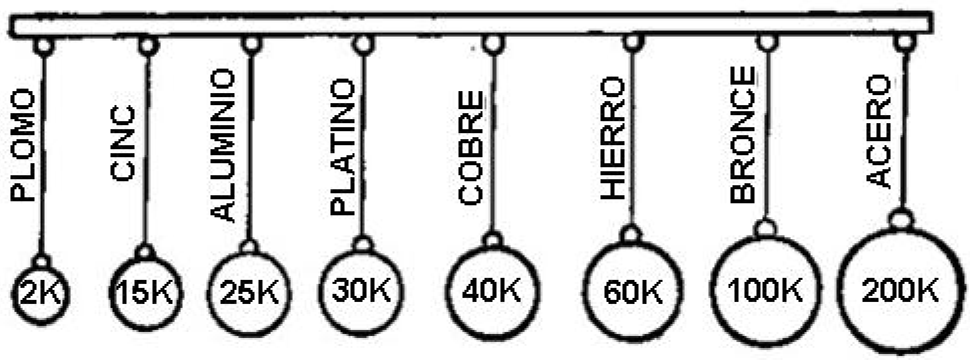


Figura 47. ¿Qué carga destruye un cable según el metal que lo compone? (la sección transversal del cable es de 1 mm^2)

La técnica, sin embargo, nunca permite que las barras y pesos se sometan a su máxima resistencia. Una construcción en estas condiciones sería bastante insegura. Defectos muy insignificantes del material, imperceptibles a la vista, o sobrecargas intangibles, al someter el material a vibraciones y cambios de temperatura, será motivo suficiente para que las barras se doblen, los pesos se rompan y la construcción se desplome. Se hace necesario dejar un "margen de resistencia". Es decir, que para que las fuerzas que actúan no sobrepasen la tensión de ruptura de los materiales, es imprescindible que la carga solo ejerza sobre el material la cuarta, sexta u octava parte, de acuerdo al material empleado y sus condiciones de uso.

Volvamos a nuestro cálculo anterior: "¿qué fuerza bastará para la destrucción de un cable de cobre cuyo diámetro es de *D* centímetros?" Su sección es igual a ¼ de π D^2 cm^2. O bien 25 π D^2 mm^2. Consultando nuestra tabla ilustrada encontramos que un cable de cobre cuya sección transversal mide 1 mm^2, se rompe al aplicarle una fuerza de 40 kilogramos. Esto quiere decir, que para romper nuestro cable basta aplicarle una fuerza de (40) × (25 π D^2) = 1.000 π D^2 kilogramos = 3.140 D^2 Kilogramos.

Según indican nuestros cálculos, el cable pesa 6.900 D^2 kilogramos, es decir, 2,2 veces más. De acá se concluye que el cable de cobre no sirve para medir el fondo del océano, incluso dejando un "margen de resistencia". Un cable de cobre de 5 kilómetros de longitud, se rompería por su propio peso.

2. La perpendicular más larga

En general, todo cable tiene un límite de longitud; cuando se sobrepasa dicha longitud, el cable se rompe por su propio peso. La perpendicular no puede tener una longitud arbitraria. Tiene una longitud determinada que no debe sobrepasar. El aumento del grosor del cable no varía el resultado: si se duplica el diámetro del cable, este puede soportar una carga cuatro veces mayor, pero también aumenta su peso cuatro veces más. La longitud límite no depende del grosor del cable (el grosor es proporcional al peso), sino del material: para el hierro existe una longitud, para el cobre, otra; y para el bronce una tercera. Fácilmente se pueden calcular las longitudes límite; después de efectuar los cálculos del artículo anterior, el lector puede realizarlos sin mayores explicaciones. Si la sección transversal del cable es s (cm^2), la longitud L (km) y el peso de 1 cm^3 del material es p (gramos), entonces todo el cable pesa 100.000 $s L p$ (gramos); y puede soportar una carga de 1.000 Q × 100 s = 100.000 $Q s$ (gramos), siendo Q (kilogramos) la carga de ruptura sobre 1 mm^2. Esto quiere decir que en el caso mencionado 100.000 $Q s$ = 100.000 $s L p$.

De ahí resulta que la longitud, en kilómetros, es

$$L = Q / p$$

Mediante esta sencilla fórmula resulta fácil calcular la longitud límite de un cable o un hilo de cualquier material. Anteriormente encontramos la longitud límite para el cobre al sumergirlo en el agua.

Fuera del agua, dicho límite es menor e igual a

$$Q / p = 40 / 9 = 4{,}4 \text{ kilómetros.}$$

He aquí las longitudes límites para cables de algunos materiales:

Para el plomo	200 m
Para el cinc	2,1 kilómetros
Para el hierro	7,5 kilómetros
Para el acero	25 kilómetros

Pero técnicamente no es posible emplear hilos perpendiculares con estas longitudes; pues esto significaría forzar los materiales hasta grados inadmisibles. Es necesario cargarlos hasta el valor permitido para su tensión de ruptura; así por ejemplo, para el hierro y acero, este valor corresponde a una cuarta parte de la longitud límite. Esto quiere decir que técnicamente no es posible utilizar un hilo vertical de hierro de más de 2 kilómetros de longitud, ni un hilo de acero de más de 6¼ de kilómetros de largo.

Si se sumerge verticalmente un hilo de hierro o acero en el agua, su longitud no debe sobrepasar la octava parte de su longitud límite. Pero un hilo de esta longitud no sirve para medir el fondo del océano en los lugares más profundos. Para hacer tales mediciones se debe emplear un acero especialmente sólido.[2]

3. El material más fuerte

Entre los materiales más resistentes a la ruptura se encuentran el acero y el níquel cromado: para romper un cable de acero de un grosor de 1 mm^2, debe someterse a una tensión de 250 kilogramos.

Se comprende mejor lo que esto significa, si se observa la Fig. 48. Un delgado cable de acero (con un diámetro de poco más de 1 mm) soporta un pesado cerdo. La plomada para medir el fondo del océano se fabrica con este tipo de acero. Como 1 cm^3 de acero pesa en el agua 7 gramos y admite una carga de $250/4 = 62$ kg/mm^2, la longitud extrema (crítica) de la plomada de acero es de

$$L = 62 / 7 = 8{,}8 \text{ kilómetros}$$

[2] En los últimos tiempos, para la medición del fondo del mar no ha utilizado ninguna plomada con cable, sino el reflejo del sonido del fondo del agua (la “ecoplomada”).

Figura 48. Un cable de acero de cromo-níquel aguanta una carga de 200 kg por mm^2

Pero el lugar más profundo del océano se encuentra más abajo. Por lo tanto, hace falta utilizar materiales menos sólidos y se debe emplear la plomada con extremo cuidado, si se quieren medir los lugares más profundos del océano.

Surgen también las mismas dificultades al realizar “exploraciones” en la atmósfera, con ayuda de cintas con aparatos de registro automático. En un observatorio, cerca de Berlín, se utiliza una cinta de 9 kilómetros, cuyo cable no sólo tiene que resistir la tensión de su propio peso, sino también la tensión ocasionada por la temperatura y el peso de la cinta (el tamaño de la cinta es de 2 × 2 m.)

4. ¿Qué es más fuerte que un cabello?

A primera vista parece que el cabello del hombre puede disputar su resistencia solamente con un hilo de tela de araña. Esto no es así, ¡el cabello es más resistente que cualquier metal! En realidad el cabello del hombre resiste una carga de 100 gramos, teniendo un grosor insignificante comparado con un hilo cuyo grueso es de

1 mm^2. El cabello tiene un diámetro de 0,05 mm, por lo tanto, su sección transversal es de

$$1/4 \times 3.14 \times 0{,}052 = 0{,}002 \text{ mm}^2$$

es decir, de 1/500 mm^2. Lo que quiere decir que si un área de 0,002 mm^2 soporta una carga de 100 gramos, l mm^2 soportará una carga de 50.000 gramos ó 50 kilogramos. Si observamos la tabla que indica la resistencia de algunos materiales (Fig. 47), veremos que el cabello del hombre, por su resistencia, debe ubicarse entre el cobre y el hierro... ¡Así que el cabello es más fuerte que el plomo, el zinc, el aluminio, el platino, el cobre y solo es más débil que el hierro, el bronce y el acero!
Por esto es por lo que se puede dar fe al autor de la novela "Salambó"[3] cuando dice que los antiguos pobladores de Cartago consideraban que el cabello de la mujer era el mejor material para transportar sus pesadas máquinas y proyectiles.

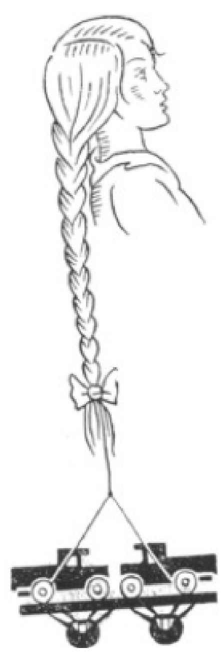


Figura 49. ¿Cuánta carga puede soportar el cabello de una mujer?

[3] *Salambó*. Novela histórica escrita por Gustave Flaubert, en 1.862, con personajes tanto históricos como ficticios. La acción de la obra tiene lugar antes y durante la Guerra de los Mercenarios, que aconteció en el siglo III a. C., en la ciudad fenicia de Cartago. *(N. del E.)*

No nos debe extrañar la Fig. 49, que representa una plataforma de tren y dos automóviles de carga, suspendidos de la trenza de una mujer; fácilmente se puede calcular que una trenza de 200.000 cabellos puede soportar una carga de 20 toneladas.

5. ¿Por qué los marcos de las bicicletas son tubulares?

¿Qué ventaja presentan para las bicicletas, en cuanto a solidez se refiere, los tubos frente a las barras compactas, si ambos tienen la misma sección transversal? Ninguna, en tanto se hable de la resistencia frente a una rotura o una presión exterior: el tubo y la barra se rompen con la misma facilidad. Pero existe una gran diferencia entre ellas en cuanto a la resistencia que ofrecen al doblado: es más fácil doblar la barra sólida que doblar el tubo con idéntica sección transversal.

Sobre esto escribió en términos muy elocuentes Galileo,[4] el creador de la mecánica de los sólidos (estudio sobre la elasticidad). El lector no me reprochará ser demasiado parcial de sus magníficas enseñanzas, cuando una vez más cito de sus obras: "*Permítaseme agregar*, escribió Galileo en su "Discurso y demostración matemática en torno a dos nuevas ciencias referentes a la mecánica y al movimiento local", *algunas observaciones en relación a la resistencia de los cuerpos sólidos, que se utilizan tanto en el artesanado (técnica) como en la naturaleza, presentándose miles de casos.*

En ellos, sin la menor duda, encontramos un aumento de la elasticidad en un grado mucho mayor, como se puede ver con facilidad, en el ejemplo de los huevos de un pájaro y de la caña que se distingue, a pesar de su peso ligero, por su gran resistencia frente a dobleces y roturas. Si observamos una brizna de paja, no una verdadera espiga, a la cual supera en peso un tallo, debido a que su cantidad de materia es más compacta y masiva, vemos sin embargo, que el tallo es mucho menos firme frente a los dobleces y roturas. Fue notado en la práctica y confrontado por la experiencia, que las barras vacías en su interior, así como los tubos de

---

[4] *Galileo Galilei* (1.564 - 1.642). Astrónomo, filósofo, matemático y físico italiano, relacionado estrechamente con la revolución científica. Se interesó por casi todas las ciencias y artes (música, literatura, pintura). Sus logros incluyen la mejora del telescopio, gran variedad de observaciones astronómicas, la primera ley del movimiento y un apoyo determinante para el copernicanismo ("La Tierra no se encuentra en el centro del universo. La Tierra y los demás planetas giran alrededor del Sol"). Considerado como el "padre de la astronomía moderna", el "padre de la física moderna" y el "padre de la ciencia". *(N. del E.)*

madera y de metal son más fuertes que los cuerpos macizos de igual longitud y mismo peso, los cuales obligatoriamente son más delgados. De modo magistral se demostró la aplicación de esta observación, reparando una copa vacía por dentro para probar la solidez y al mismo tiempo la ligereza."

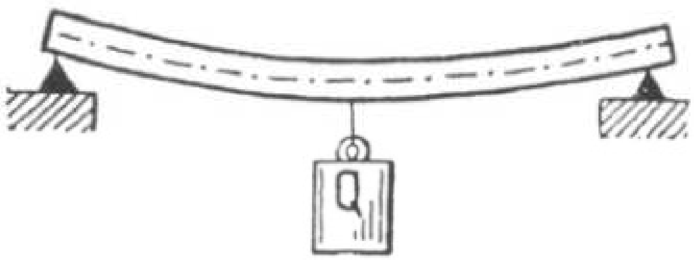


Figura 50. Rotura de una viga.

Comprendemos el por qué de esto, si observamos de cerca la tensión que se produce en las vigas cuadradas curvadas. En la mitad de la barra *AB* (Fig. 50), que se encuentra apoyada en sus extremos, obra el peso *Q*. Bajo la influencia de esta carga, desciende la barra. ¿Qué sucede entonces? La capa superior de la viga se contrae y la capa inferior, por el contrario, se dilata, y algunas capas intermedias ("neutrales") no se contraen ni se dilatan. En la parte de la viga que se dilata, se produce una fuerza elástica que se opone a la dilatación; y en la parte que se contrae, se produce una fuerza que se opone a la contracción. Ambas fuerzas tratan de enderezar la viga y esta reacción al plegamiento aumenta a medida que se dilata la viga (siempre que no alcance el "límite de elasticidad"[5]), mientras que la tensión debida al peso *Q* no supere el límite de elasticidad, la viga continúa arqueada.

Se comprueba que la mayor reacción frente al pandeo se efectúa en las capas superiores e inferiores de la viga: la parte media tiene menos participación, cuanto más cerca se encuentra de las capas neutrales.

Sacando deducciones de lo antedicho, indicaba un especialista: "Como el material que se encuentra cerca de las capas neutrales participa débilmente en la resistencia a la sinuosidad, resulta ventajoso colocar más cantidad de material sobre las superficies, y reducirlo en la parte media. En las vigas de hierro se efectúa una

[5] El *límite de elasticidad* o *límite elástico*, es la tensión máxima que puede soportar un material elástico, sin sufrir deformaciones permanentes. *(N. del E.)*

distribución eficiente de material (Fig. 51). Estas vigas tienen idénticas bases, con las mismas plataformas cuya sección presenta una reducción conveniente".

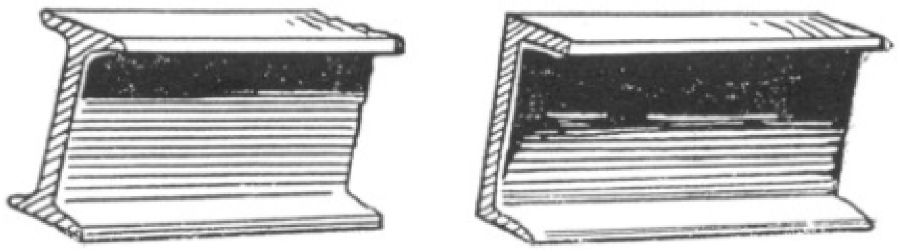


Figura 51. Viga con dos pestañas y viga hueca

Ahora resulta comprensible para el lector la ventaja de los tubos frente a las barras. Presentamos más ejemplos. Tenemos dos barras redondas de igual longitud; una es compacta y la otra es hueca, las secciones de las barras son iguales y tienen el mismo ancho. El peso de ambas barras es idéntico. Sin embargo, existe entre ellas una gran diferencia entre sus reacciones a la tensión: los cálculos indican que la barra tubular[6] es 212% más firme (más resistente a las roturas) que la barra sólida, es decir, más del doble.

6. El cuento de las siete barritas

"Compañeros, he aquí la moraleja: estando separadas todas las barritas se harían pedazos, pero juntas, probaremos quién las puede romper".

(Serafimovich "En medio de la noche")[7]

De todos es conocido el antiguo cuento de las siete barritas. Para convencer a sus hijos, de que debían vivir como amigos, el padre les propuso romper un puñado de siete barritas.

---

[6] En caso de que el diámetro del tubo sea igual al diámetro de la barra compacta.

[7] *Alexander Serafimovich Popov* (1.863-1.949). Matemático, físico y escritor ruso. En 1.903 se publicaron tres volúmenes con historias de Serafomovich. Se unió al Ejército Rojo en 1.918, durante la Guerra Civil. Trabajó en la Guerra como corresponsal de los diarios Izvestiya y Pravda. Entre su extensa obra son dignas de mención, entre otras, La Ciudad en la Estepa (1.912) y El Torrente de Hierro (1.924) -su novela más famosa-. *(N. del E.)*

Los hijos intentaron hacer esto sin éxito. Entonces el padre quitándoles el puñado, desató las barritas, y rompió fácilmente cada una de las barritas por separado. El cuento tiene sentido para nosotros, si lo analizamos desde el punto de vista de la Mecánica, es decir, desde el punto de vista de la teoría de la resistencia de materiales.

La magnitud de la ruptura de las barritas se mide en Mecánica por la "flecha de pre-rotura", *x* (Fig. 52)[8]. Cuanto más pronunciada es la flecha en la barra, tanto más cerca está el momento de la rotura. En la siguiente fórmula se indica la magnitud de la flecha de pre-rotura:

$$x = \left(\frac{1}{12}\right)\frac{Pl^3}{\pi k r^4}$$

Siendo *x* la flecha de pre-rotura, *P* la fuerza que actúa sobre la barra; *l* la longitud de la barra; π = 3,14…; *k* el coeficiente elasticidad de la barra; *r* el radio del círculo de la barra.

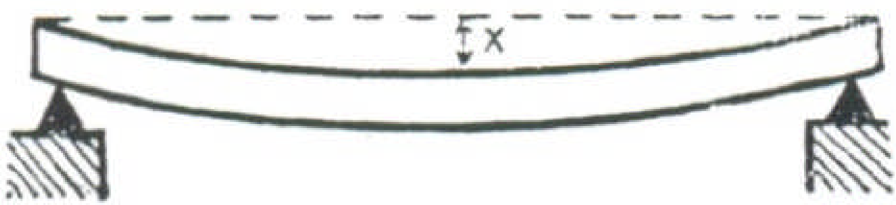


Figura 52. Flecha de pre-rotura

Si aplicamos esta fórmula al puñado de barritas, las siete barritas se comportan de la forma que se muestra al final de este capítulo, en la Fig. 53, en la que se ve a alguien intentando romper el manojo de barritas.

Para analizar la ruptura de este manojo como si fuera una barra compacta, se deben atar fuertemente las barras, para obtener un valor más aproximado. En este problema no logramos hallar una solución exacta. De la Fig. 53, se deduce fácilmente el diámetro del manojo en su conjunto, el cual es casi tres veces mayor

[8] La *Flecha* de una barra apoyada en sus extremos, a la cual se le coloca una carga en su centro, es la máxima distancia entre un punto central de la barra sin carga y el mismo punto en la barra con carga. *(N. del E.)*

que el diámetro de cada una de las barritas. Esto parece indicar que resulta mucho más fácil doblar o romper las barritas aisladas que romper el manojo. Si en ambos casos, se quiere lograr la misma flecha de rotura, entonces es necesario aplicar una fuerza *p* a cada barrita suelta y, de igual manera, se aplica una fuerza *P* a todo el manojo. Se obtiene la relación entre las fuerzas *p* y *P*, de la ecuación:

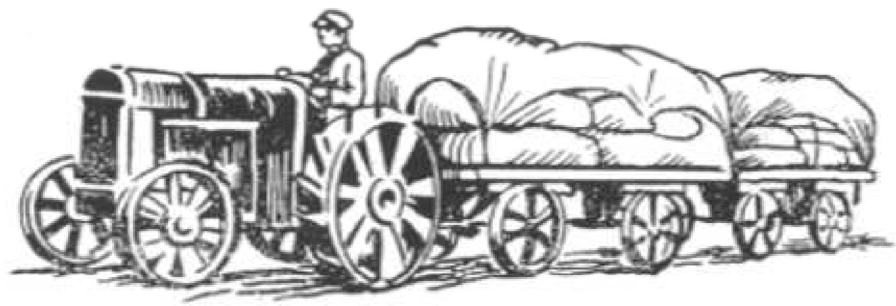
$$\left(\frac{1}{12}\right)\frac{pl^3}{\pi kr^4} = \left(\frac{1}{12}\right)\frac{Pl^3}{\pi k(3r)^4}$$

y de aquí resulta que

$$p = \frac{P}{81}$$

Vemos, por consiguiente, que el padre rompiendo las siete barritas cada una separadamente necesitaba para esto 80 veces menos fuerza que los hijos queriendo romper el manojo.

Figura 53



CAPÍTULO 8
TRABAJO, FUERZA, ENERGÍA

Contenido:

1. Lo que muchos no saben sobre la unidad de trabajo

- ¿Qué es un kilográmetro?

- El trabajo realizado para subir un kilogramo a la altura de un metro - es la respuesta común.

A muchos les satisface esta definición de la unidad trabajo, especialmente cuando se añade a ella que se levanta el peso sobre la superficie terrestre. Si nos quedamos satisfechos con tal definición, entonces vale la pena examinar el siguiente problema, planteado por el famoso físico Wollaston[1], y publicado hace 30 años en una revista de matemáticas:

"Desde un cañón de 1 metro de longitud, en posición vertical, sale disparada una bala de 1 kilogramo de peso. Los gases impulsores actúan sobre una extensión de 1 metro.

Como durante el resto de la trayectoria de la bala, la presión de los gases es igual a cero, éstos levantan, por tanto, un kilogramo á 1 metro de altura, es decir, que los gases realizan en total, el trabajo de 1 kilográmetro. ¿Es posible que su trabajo sea tan pequeño?

Si esto fuera así, un hombre podría lanzar con la fuerza de sus manos las balas de los cañones, sin usar pólvora. Queda claro que en el cálculo que presentamos acá se ha cometido un gran error.

¿Cuál?

El error consiste en que al explicar el trabajo realizado, dedicamos la atención a una pequeña parte de éste, despreciado la parte más importante del mismo. No tuvimos en cuenta que al salir la bala del cañón, llevaba la velocidad que alcanzó al momento de su lanzamiento. El trabajo de los gases impulsores la elevó, como es sabido, a 1 metro de altura, aumentando considerablemente su velocidad. Este trabajo poco conocido, se calcula fácilmente, si se conoce la velocidad de la bala. Si, por ejemplo, dicha velocidad es igual á 600 m/seg, es decir, a 60.000 cm/seg, y la bala tiene una masa de 1 kilogramo (1.000 gramos), su energía cinética será igual a

---

[1] *William Hyde Wollaston* (1.776 -1.828). Físico y químico británico. Perfeccionó la pila inventada por el físico italiano, Alessandro Volta.
Estudió medicina pero abandonó su profesión para dedicarse a la química, la cristalografía, la metalurgia y la física.
Se enriqueció desarrollando un método físico-químico para procesar platino. Descubrió el paladio en 1.803 y el rodio en 1.804.
Realizó experimentos con electricidad, sentando las bases para el diseño del motor eléctrico. Michael Faraday, físico y químico británico, fue el primero en construir dicho motor.
También realizó un trabajo sobre dispositivos ópticos y realizó observaciones de líneas oscuras en el espectro solar que le condujeron al descubrimiento de elementos en el Sol.
(N. del E.)

$$\frac{mv^2}{2} = \frac{1.000 \text{ x } 60.000^2}{2} = 18 \text{ x } 10^{11} \text{ ergios}$$

Un ergio es igual a una dina × centímetro (trabajo realizado por una fuerza de 1 dina al desplazar un cuerpo a lo largo de 1 centímetro). Como un kilográmetro contiene 1.000.000 × 100 = 10^8 dina-centímetros, la reserva de energía del movimiento de la bala es igual a

$$\frac{18 \text{ x } 10^{11}}{10^8} = 18.000 \text{ kilogrametros}$$

¡Inconscientemente quedó olvidada una cantidad bastante representativa de trabajo, debido a la incorrecta evaluación de los kilográmetros!

Ahora queda claro, cuán importante resulta este cálculo adicional:

El kilográmetro es el trabajo realizado al alzar de la superficie de la tierra una carga de un kilogramo, inicialmente en reposo, a 1 metro de altura, de tal manera que al finalizar la acción, la velocidad de la carga es igual a cero.

2. ¿Cómo se mide un kilográmetro de trabajo?

Esto no presenta ninguna dificultad: basta tomar una pesa de 1 kilogramo y levantarla á 1 metro de altura.

Figura 53. ¿Cómo se realiza un trabajo igual a un kilográmetro?

Sin embargo, ¿se puede levantar el peso del suelo, aplicando 1 kilogramo de fuerza?

Una fuerza de un kilogramo no lo levanta. Es necesario aplicar una fuerza mayor. La fuerza adicional produce una aceleración del movimiento. La acción constante de la fuerza produce una aceleración de la carga que levanta; por esta razón, el peso tendrá una pequeña velocidad al final, diferente de cero, lo que quiere decir que el trabajo realizado es mayor que un kilográmetro.

¿Cómo se debe levantar un peso de 1 kilogramo hasta un metro de altura, para que el trabajo realizado mida exactamente un kilográmetro? Debe subirse el peso con sumo cuidado. Al iniciar el ascenso hay que empujar el peso hacia arriba, con una fuerza superior a un kilogramo. Habiendo adquirido el peso una ligera velocidad en dirección ascendente, se deja de presionar el peso con la mano, dejando que éste se mueva por su propia inercia. En el instante en que la mano deja de presionar el peso, y se debe obrar de tal modo que el cuerpo que se mueve por inercia, termine su recorrido de 1 metro, en el preciso momento en que su velocidad sea igual a cero.

También se puede proceder de otro modo: en todo momento, mientras el cuerpo se desplaza, se frena el peso con la mano, y se detiene al recorrer una distancia de 1 metro. Para esto debemos montar varias pesas de modo que en al comienzo pesen más de 1 kilogramo, a medida que se asciende se van retirando pesas de modo que en un determinado momento el peso es de 1 kilogramo, habiendo desaparecido el peso adicional, y luego, el peso se reduce por debajo de 1 kilogramo, así podemos lograr que el trabajo total sea igual a un kilográmetro.

3. Cómo no se debe calcular el trabajo

Acabamos de ver cuán complicado es ejecutar un trabajo equivalente a 1 kilográmetro, levantando un kilogramo a una altura de un metro. Por esta razón, es mejor no utilizar estos términos que nos confunden fácilmente, porque se crea un gran enredo al tratar de determinar el valor de un kilográmetro.

Resulta mucho más útil otra definición, que no genera confusión: el kilográmetro es el trabajo efectuado por una fuerza de un kilogramo que recorre un espacio de un metro, siempre que la dirección de la fuerza coincida con la dirección del movimiento.[2]

La última condición -la coincidencia de la dirección de la fuerza con la dirección del movimiento-, es absolutamente necesaria. Si la omitimos, el cálculo del trabajo realizado puede conducir a errores enormes, tales como los que podemos encontrar en el libro de un escritor y pedagogo bastante conocido, que recopiló datos para resolver problemas de mecánica, sin tener una adecuada formación. En uno de sus textos presenta el problema que mostramos a continuación:

"Un automóvil de 850 kilogramos de peso, marcha a una velocidad de 2 kilómetros por minuto. ¿Cuál es su potencia?".

---

[2] Un lector me objetó que hay algunos casos en los cuales los cuerpos pueden llevar cierta velocidad al finalizar su desplazamiento, velocidad que debe tenerse en cuenta. De ello, concluye que una fuerza de un kilogramo que recorre 1 metro de distancia, realiza un trabajo mayor que un kilográmetro. Es totalmente cierto que al finalizar el recorrido, el cuerpo lleve alguna velocidad. Pero el trabajo efectuado por una fuerza, consiste realmente en que ella le transmite al cuerpo determinada velocidad, y le da una reserva de energía cinética, que equivale a un kilográmetro. De ser así, se altera la ley de conservación de energía: recibe menos energía de la que gastó.
Otra cosa sucede al levantar verticalmente el cuerpo; al subir 1 kilogramo a una altura de 1 metro, aumenta la energía potencial por encima de 1 kilográmetro, y al llegar arriba, el cuerpo adquiere energía cinética: recibe así más energía que la que gastó.

La potencia es el trabajo que se realiza en un segundo.

¿Cómo calcula este autor la potencia? He aquí la solución.

$$850 \times 2 / 60$$

Esto contiene el siguiente error. Ante todo, el autor no tiene en cuenta que la dirección del peso del automóvil no coincide con la dirección de su movimiento, realizando el cálculo como si el automóvil se elevara perpendicularmente hacia el espacio. Luego multiplica los kilogramos por los kilómetros recorridos, y no por los metros; el resultado, por lo tanto, no corresponde a kilográmetros sino a "kilogramo-kilómetros".

Esencialmente, por cualquiera de las causas expuestas, no se puede calcular en el problema la potencia del automóvil. Para efectuar este cálculo es necesario conocer la fuerza que pone en marcha al automóvil. Esta es igual a la resistencia que ofrece el automóvil porque en una vía horizontal, esta resistencia puede superar las fuerzas motrices. Si la resistencia del automóvil en la carretera es igual al 2% de su peso, entonces se debe calcular la fuerza que pone en movimiento al automóvil, así:

$850 \times 0{,}02$ kg

Multiplicando esta fuerza por la longitud del trayecto recorrido en un segundo, (es decir, 2.000 m / 60 seg), tenemos que el trabajo realizado en un segundo es igual a

$$\frac{850 \text{ x } 0{,}02 \text{ x } 2.000}{60} = 567 \frac{\text{kilogrametros}}{\text{seg}}$$

Este resultado es 20 veces mayor que el encontrado por el mencionado autor, permite mostrar la potencia, no sólo en kilográmetros por segundo, sino de una unidad mucho mayor, el llamado "caballo de vapor"[3]. Un caballo de vapor es igual[4]

[3] A veces se habla también de "fuerza de caballo". De este término ya caduco sería conveniente concluir que un *caballo de fuerza* no es una unidad de fuerza sino de potencia y además no de 1 sino de 1 y ½ caballos vivientes.

[4] El *caballo de fuerza* (*HP*) nació cuando James Watt necesitó expresar la potencia de su invención: la máquina de vapor. Hasta ese momento se usaban los caballos para mover los molinos, y Watt los usó como referencia. Estimó que un caballo podía levantar 33.000 lb de agua a un pie de una altura en un minuto. Así nació la unidad de medida *horsepower* (*HP*), término inglés que literalmente significa *fuerza de caballo*, unidad que se ha popularizado como *caballo de fuerza*.

a 75 kilográmetros por segundo. Es decir, la potencia de nuestro automóvil es igual a

567 / 75 = 7,56 caballos de vapor

4. El tiro de un tractor

Problema*:*

La potencia del tractor Fordson es igual á 10 caballos de vapor. Si:

La primera velocidad es de	2,45	kilómetros por hora
La segunda velocidad es de	4,52	kilómetros por hora
La tercera velocidad es de	11,32	kilómetros por hora

¿Cuál será la fuerza de su tiro en cada una de sus velocidades?

Solución:

Como la potencia (1 kilográmetro/segundo) es el trabajo realizado durante un segundo, es decir, en el trabajo realizado por la fuerza de tiro (en kilogramos) durante un segundo (en metros), para la "primera velocidad" del Fordson se obtiene la ecuación

$$75 \text{ x } 10 = x \frac{2{,}45 \text{ x } 1.000}{3.600}$$

en la cual *x* es la fuerza de tiro del tractor. Resolviendo la ecuación, obtenemos que *x* es aproximadamente igual a 1.000 kilogramos. De tal forma encontramos también que el tiro en la "segunda velocidad" es igual a 590 kilogramos y en la "tercera" igual a 240 kilogramos.

Cuando se trató de imponer el Sistema Métrico Decimal, originado en Francia, se buscó como unidad de Potencia un valor similar al *caballo de fuerza* inglés, pero utilizando unidades decimales. Así nació el *caballo de vapor*, (*CV*). En su definición (como se ve al principio de este artículo) se utilizan unidades del Sistema Métrico Decimal. El *caballo de vapor* (*CV*) es 1,368% menor que el *caballo de fuerza* (*HP*).
Un *HP* = 746 Watts = 76 Kg-m/seg.
Un *CV* = 736 Watt = 75 Kg-m/seg.
(N. del E.)

Sin tener en cuenta la Mecánica, “el sentido común” nos indica que el tiro es tanto mayor, cuanto menor es la velocidad del movimiento.

5. Fuerzas motrices vivas y mecánicas

¿Puede desarrollar el hombre una potencia de un caballo de vapor? En otras palabras, ¿puede él realizar, en un segundo, un trabajo de 75 kilográmetros?

Parece ser que la potencia del hombre, en condiciones normales de trabajo, es unas 10 veces más baja que la de un caballo de vapor, es decir, es igual a 7 u 8 kilográmetros por segundo.

Sin embargo, en condiciones extraordinarias, en espacios cortos de tiempo, el hombre puede desarrollar una potencia mucho mayor.

Subiendo rápidamente las escaleras, realizamos un trabajo de más de 8 kilográmetros por segundo.

Si un hombre que pesa 70 kg, sube 6 escalones cada segundo, y los escalones que tienen 17 centímetros de altura, realizará un trabajo igual a

$$70 \times 6 \times 0{,}17 = 71 \text{ kilográmetros,}$$

es decir, casi un caballo de vapor, lo que significa una potencia 1½ veces mayor que la de un caballo viviente.

Pero es natural que solo podemos soportar tal esfuerzo de trabajo durante algunos minutos, y después hay que descansar. Si tenemos en cuenta estos intervalos de inactividad, entonces el promedio de nuestro trabajo no excederá 0,1 caballos de vapor.

Figura 54. ¿Puede desarrollar el hombre una potencia de un caballo de vapor?

Hace poco tiempo, en Inglaterra, durante unos campeonatos de carreras de velocidad, (100 yardas, es decir 90 metros) se presentaron casos en los cuales ¡los corredores desarrollaron una potencia de 550 kilográmetros, es decir, 7,4 caballos de vapor!

Un caballo también puede elevar su potencia en 10 veces mayor y aun más. Si, por ejemplo, un caballo de 500 kilogramos de peso salta a una altura de 1 metro en un segundo, habrá realizado un trabajo de 500 kilográmetros (Fig. 55); esto corresponde a una potencia de

$$500 / 75 = 6,7 \text{ caballos de vapor.}$$

No olvidemos que la potencia del caballo de vapor es 1 ½ veces mayor que la de un caballo viviente, y por lo tanto, en el presente caso, tenemos un aumento de potencia de más de 10 veces.

Figura 55. ¿Cuándo el caballo vivo desarrolla una potencia de 7 caballos de vapor?

En los trabajos del campo, sucede que tanto el hombre como el caballo pueden trabajar a veces con una sobrecarga de 200%, es decir, que desarrollan una potencia triple de la normal. Esta capacidad de las fuerzas motrices vivas, de poder aumentar temporalmente su potencia repetidas veces, les da una mayor ventaja frente a las fuerzas motrices mecanizadas.

En una carretera en buen estado y sin resaltos, es preferible un automóvil de 10 caballos de vapor, a un carro tirado por dos caballos vivos.

Sin embargo, en un camino arenoso, se atrancará el automóvil, en tanto que el par de caballos, capaces de desarrollar una potencia 5 veces o más que un caballo de vapor, pueden superar estas dificultades del camino sin problemas.

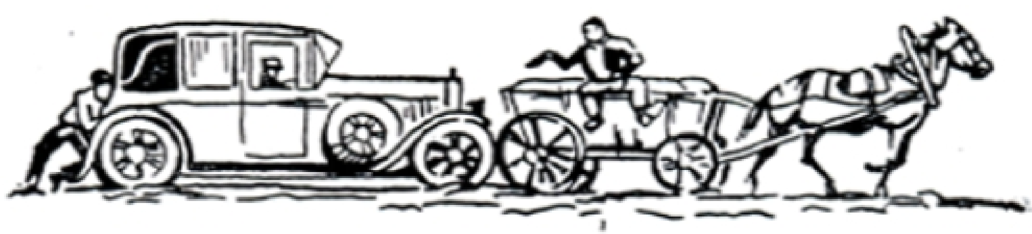


Figura 56. La fuerza motriz viva ¿cuándo es preferible y superior a la de la máquina?

"*Bajo ciertos puntos de vista*, dice el físico Soddy, refiriéndose a esto, *el caballo indudablemente más útil que la máquina.*

En efecto, no podemos imaginar esto, hasta que vemos un automóvil atascado en cada subida, mientras que dos caballos tiran de un coche, arrastrándolo con extrema facilidad, siendo necesario enganchar al auto no menos de 12 á 15 caballos cada vez que se atasque.”

6. Cien liebres y un elefante

Comparando las fuerzas motrices vivas y mecánicas, es necesario tener en cuenta otra circunstancia importante. Los esfuerzos de varios caballos no se suman aritméticamente. Dos caballos tiran con menor fuerza que el doble de la fuerza de un caballo; tres caballos tiran con menor fuerza que el cuádruplo de la fuerza cuádruplo de un caballo, y así sucesivamente.

Esto se debe a que varios caballos, que estén enganchados juntos, no unifican sus fuerzas, y a veces uno impide el esfuerzo del otro. La práctica indica que la potencia, tratándose de varios caballos, produce el siguiente tiro:

Caballos en tiro	Potencia de cada caballo	Potencia general
1	1,00	1,0
2	0,92	1,9
3	0,85	2,6
4	0,77	3,1
5	0,70	3,5
6	0,62	3,7
7	0,50	3,8
8	0,47	3,8

Y así, trabajando juntos cinco caballos, no producen un tiro cinco veces mayor, sino solamente 3½ veces mayor; 8 caballos desarrollan una fuerza sólo 3,5 veces mayor que la fuerza de tiro de un solo caballo, y aumentando aún más el número de los caballos que trabajan juntos, el resultado es todavía más deficiente.

De allí se deduce, que el tiro de un tractor con diez caballos de vapor no se puede sustituir por un tiro de 15 caballos vivos que trabajan juntos.

En general, ninguna cantidad de caballos vivos puede sustituir un solo tractor, aún si tiene una potencia tan baja como el "Fordson".

Los franceses tienen un proverbio que dice: "Cien liebres no hacen un elefante". Con mayor razón podemos decir: "Cien caballos no pueden sustituir a un solo tractor".

7. Las máquinas son los esclavos de la humanidad

Rodeados por todos los lados de motores mecánicos, no siempre nos damos cuenta de la potencia de estos "esclavos mecánicos".

Lo que distingue a los motores mecánicos de los vivos, es la concentración de una enorme potencia en un espacio pequeño. La máquina más potente que conoció el mundo antiguo fue el caballo o el elefante. En ese tiempo solo se podía conseguir un aumento de potencia, aumentando del número de animales. Pero unificar la capacidad de trabajo de muchos caballos, es una tarea que ha podido resolver sólo la técnica de la época moderna.

Hace cien años la máquina más potente fue el motor de vapor de 20 caballos que pesó 2 toneladas. Al caballo de vapor le correspondían 100 kilogramos del peso de la máquina.

Identificando el caballo vivo con el caballo de vapor para simplificar la capacidad de trabajo (aunque en realidad esta unidad de la potencia supera en 1½ veces a la capacidad del caballo vivo), un caballo de vapor pesa 500 kilogramos (peso medio del caballo) y en caso de cualquier motor mecánico un caballo de vapor pesa 100 kilogramos. Es como si la máquina de vapor reuniera la potencia de 5 caballos en un solo organismo.

Encontramos la mejor relación entre potencia y peso. en la locomotora moderna de 2.000 caballos, que pesa 100 toneladas, y en el caso de la locomotora eléctrica, con una potencia de 4.500 caballos de vapor, y un peso de 120 toneladas, donde 1 caballo de vapor pesa solamente 27 kilogramos. Los motores de aviación también constituyen un enorme progreso en este sentido. Un motor de 550 caballos de vapor, pesa en total 500 kilogramos; aquí un caballo de vapor corresponde a un kilogramo de peso.[5]

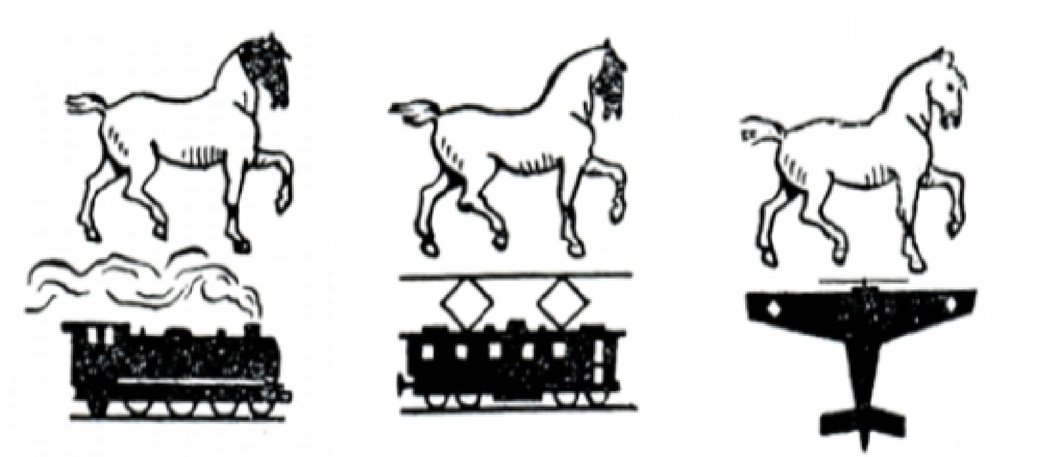


Figura 57. La parte negra de cada caballo indica la parte de su peso que corresponde a un caballo de vapor de los diversos motores mecánicos mostrados en la parte inferior de la gráfica.

En la Fig. 57 esta relación está reflejada de una manera visual: la parte negra de los contornos del caballo indica a qué corresponde el peso de un caballo de vapor en relación al motor mecánico.

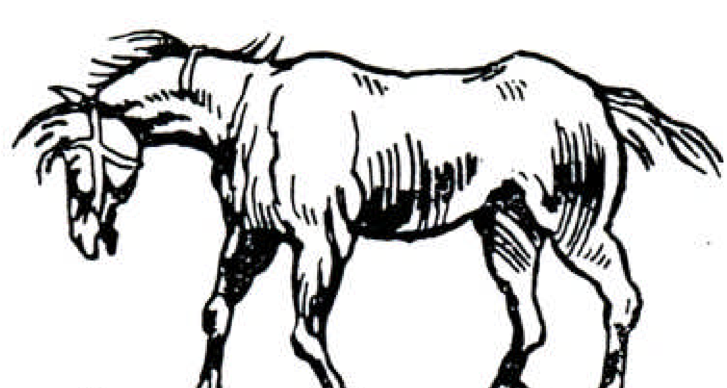


Figura 58. La relación entre el peso de un motor de aviación y un caballo vivo con potencias iguales

[5] En algunos motores modernos de avión, el peso se reduce á ½ kilogramo por caballo de vapor y aún menos.

Aún resulta más clara la Fig. 58; aquí el caballo pequeño y el grande, representan claramente la insignificancia del peso de los músculos de acero en comparación con la gran masa muscular de los animales.

Figura 59. Un motor de aviación con un tanque cuya capacidad es de 2 litros, tiene una potencia de 162 caballos.

Finalmente la Fig. 59 nos permite visualizar la potencia absoluta de un pequeño motor de aviación: 162 caballos de vapor corresponden a un tanque cuyo volumen es de 2 litros.

Aún no se tiene la última palabra en la pugna por la supremacía entre los avances de la técnica contemporánea.[6]

Todavía no hemos extraído toda la energía mecánica que se encuentra depositada en el combustible. Veamos qué trabajo se puede realizar con una caloría, es decir, que cantidad se requiere para elevar 1 grado, la temperatura de 1 litro de agua.

[6] En ese momento se concede la preeminencia al motor-cohete que funciona a base de gasolina y oxígeno, preparado en Berlín por los ingenieros alemanes de la "Unión para la Navegación Interplanetaria"; el motor, cuyo peso es de 250 g, desarrolla 1.380 caballos de vapor, es decir, que un caballo de vapor corresponde á 5,5 g de este motor.

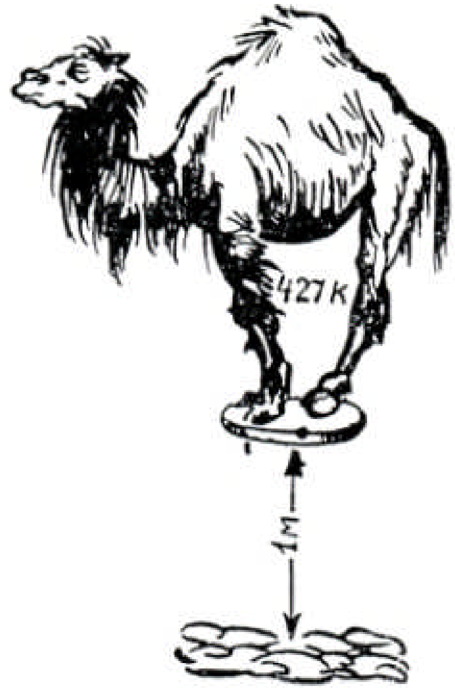


Figura 60. Una caloría convertida en trabajo mecánico, es capaz de subir 427 kilogramos a una altura de un metro

Si se transforma toda esta energía calorífica en energía mecánica, podremos realizar un trabajo de 427 kilográmetros, es decir, que con dicha cantidad de energía, podemos elevar una carga de 427 kilogramos á 1 metro de altura (Fig. 60).
En la realidad, los motores movidos por calor, de nuestra época, solamente aprovechan entre 10% y un 30% de cada caloría que consumen; solo extraen 100 kilográmetros de trabajo en vez de los 427 que podían extraer teóricamente, de cada caloría.
¿Cuál es la fuente de energía mecánica más potente, entre todas las que ha creado la mente humana? El arma de fuego.
La escopeta moderna, cuyo peso total de 4 kg (de los cuales, solo 2 kg pertenecen a las partes que actúan dentro de la estructura de la escopeta), desarrolla en el momento del disparo un trabajo de 400 kilográmetros. Esto no parece muy importante, pero no olvidemos que la bala se encuentra bajo la acción de los gases de la pólvora durante un corto espacio de tiempo, mientras viaja dentro del cañón de la escopeta, esto es, durante 1/800 seg.
Así como la potencia de la fuerza motriz se mide por la cantidad del trabajo ejecutado en un segundo, al referirnos al trabajo de los gases impulsores en un

segundo, obtenemos que la potencia del arma de fuego es de 400 × 800 = 320.000 kilográmetros por segundo ó 4.300 caballos de vapor.

Pero si se divide esta potencia entre el peso de las partes que actúan dentro de la estructura de la escopeta (2 kg), sabremos que un caballo de vapor corresponde en este caso, a un peso insignificante del mecanismo: ¡½ gramo!

Imaginemos un diminuto caballo de ½ gramo de peso; ¡este enanito, del tamaño de un escarabajo, posee la potencia de un caballo normal!

Si en lugar de tener en cuenta la proporción entre la potencia y el peso de la máquina, se hace la comparación con base en la potencia de cada máquina, las armas de artillería baten todas las marcas. Un cañón de artillería, americano, arroja una bala de 900 kg con una velocidad de 500 m/seg, desarrollando en 1/100 seg. aproximadamente, un trabajo de 11 millones de kilográmetros.

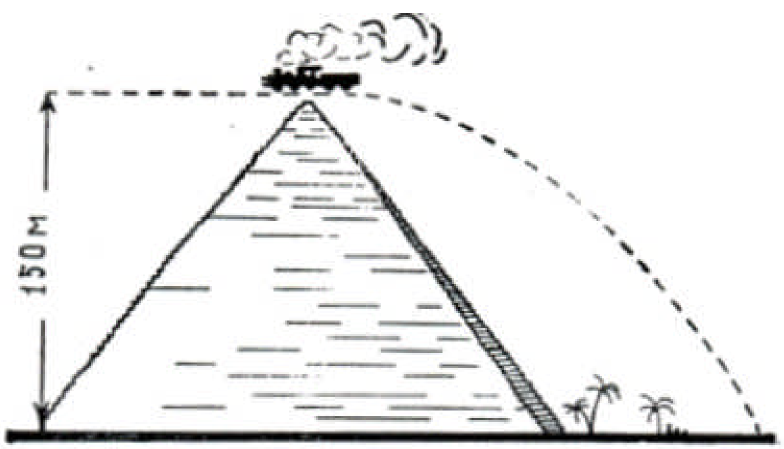


Figura 61. La energía de un cañón es suficiente para levantar un cuerpo de 75 toneladas, a la cúspide de la pirámide de Keops

La Fig. 61 visualiza este enorme trabajo: esta figura indica que el mencionado trabajo, equivale a elevar una carga de 75 toneladas (una locomotora de 75 toneladas) hasta la cúspide de la pirámide de Keops (145 metros). Este trabajo se desarrolla en 0,01 seg; lo equivale a decir que tenemos en este caso una potencia de 1.100 millones de kilográmetros ó 15×10^6 CV/seg. ¡Resulta difícil reunir tantos caballos vivos en toda la URSS!

En la Fig. 62 ilustramos la energía de un gran cañón de barco.

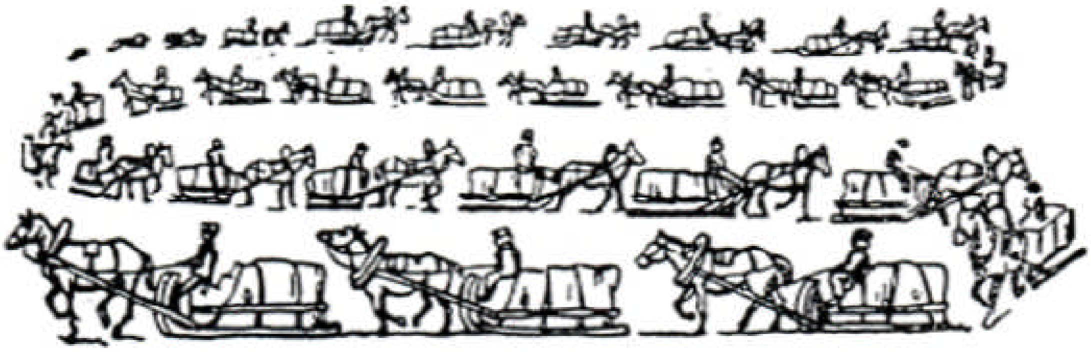


Figura 62. La energía calorífica equivalente a la energía del cañón de un barco, basta para derretir 36 toneladas de hielo

8. ¿Cómo se pesa una "caída"?

En los tiempos antiguos algunos vendedores pesaban sus mercancías del modo siguiente: la última parte requerida para equilibrar la balanza no se colocaba sobre el platillo con sumo cuidado, sino que se lanzaba desde cierta altura. El balancín del peso se balanceaba, inclinándose visiblemente hacia el lado de la mercancía, lo que atraía más al comprador, que si se hubiese pesado concienzudamente.

Pero, si el comprador esperara hasta que el peso terminara de balancearse, se asombraría del engaño producido por esta ilusión óptica: la mercancía no equilibraría la balanza.

Esto se debe a que el cuerpo que cae con fuerza, produce un aumento de peso. Mediante el siguiente ejemplo, veremos claramente lo que sucede. Desde una altura de 10 cm. dejamos caer un peso de 10 gramos sobre el platillo de la balanza. Al caer el peso, el platillo desciende 2 cm. Al caer al platillo, estos 10 gramos acumulan cierta cantidad de energía, igual al producto del peso por la altura desde la cual cayó (energía potencial):[7]

$$0{,}01 \text{ kg} \times 0{,}1 \text{ m} = 0{,}001 \text{ kilográmetros}$$

[7] La teoría habla de estos tipos de energía mecánica:
Energía Cinética: $E_K = (½).m.v^2$, relacionada con la velocidad.
Energía Potencial: $E_P = m.g.h = P.h$, relacionada con la altura.
Al estudiar los resortes se habla de la Energía Potencial Elástica:
Energía Potencial Elástica: EPE = Kx2, relacionada con la elasticidad de un resorte.
(N. del E.)

La energía acumulada se manifiesta, ya que debido a ella, la báscula bajó 2 centímetros. Esta acción se nota en la balanza por la fuerza denominada *F*. De la ecuación

$$F \times 0{,}02 \text{ m} = 0{,}001 \text{ Kilográmetros}$$

resulta que

$$F = 0{,}05 \text{ kg} = 50 \text{ g}$$

Así, el paquete de mercancía que pesa 10 g, al caer, ejerce una fuerza de 50 g sobre el platillo. Por lo tanto, el comprador no recibe el peso completo, pues le faltan 40 g; sin embargo, se aleja del mostrador, convencido de que la mercancía que ha comprado tiene el peso completo.

9. El problema de Aristóteles

2.000 años antes de que Galileo (en 1.630) expusiera las leyes de la Mecánica, Aristóteles escribió su obra "Problemas de Física"[8]. Entre los 36 problemas que se plantean en esta obra, se encuentra el siguiente:

"¿Por qué al caer un hacha de gran peso sobre un árbol, el árbol sufre leves daños, en tanto que si se golpea el árbol con un hacha de menor peso, éste se rompe?"

Por tanto, en este caso la carga que cae sobre el árbol causa menos destrozos que el hacha que se levanta y se lanza contra el árbol.

Aristóteles no pudo resolver este problema, debido a que los conceptos mecánicos de su época eran incipientes y confusos.

Veamos pues más detalladamente el problema del pensador griego.

---

[8] *Aristóteles* (384 a. C. 322 a. C.). Filósofo griego. Define en la Física conceptos, principios, acciones, elementos y posibilidades del mundo.

Desarrolla muchas teorías sobre la naturaleza de la Física, centradas en cuatro estados de la materia, que denomina *los cuatro elementos* (sólido/tierra, líquido/agua, gas/aire, plasma/fuego). En la física, Aristóteles se refiere a las relaciones entre ellos: su dinámica, cómo impactaron sobre la Tierra y cómo fueron atraídos entre sí por fuerzas desconocidas.

Dejó plasmados sus conceptos sobre la Física, en ocho libros que se relacionan entre sí. Algunos editores han publicado *Problemata* (Problemas), otros han publicado *Problemata Physika* (Problemas de Física). Si bien la obra *Problemata* se atribuye a Aristóteles, algunos críticos cuestionan la autoría de *Problemata Physika*, que pese a emplear conceptos aristotélicos, difiere en algunos puntos con las teorías de este filósofo. (*N. del E.*)

¿Qué energía cinética posee el hacha en el momento en que golpea contra el árbol? Primero posee la energía que le transmite el movimiento ascendente, debido a que el hombre levanta el hacha, y segundo, la que adquiere el hacha debido al movimiento descendente. Veamos un ejemplo. Si el hacha pesa 2 kg y asciende a una altura de 2 m, el ascenso le suministra una energía de $2 \times 2 = 4$ kilográmetros.

El movimiento descendente se encuentra bajo el efecto de dos fuerzas: la fuerza de gravedad y la fuerza muscular de la mano. Si el hacha se encuentra bajo el efecto de su propio peso, al final de su caída sólo poseerá una energía cinética igual a la energía potencial que tenía al final del ascenso, es decir 4 kilográmetros. Pero la fuerza de la mano acelera el movimiento descendiente del hacha y le suministra una energía cinética adicional; si la presión de la mano en el movimiento ascendente y descendente es uniforme, la energía que adquiere durante el descenso, es igual a la que gana durante el ascenso, es decir, 4 kilográmetros. Así que, en el momento en que el hacha golpea el árbol, tiene una energía de 8 kilográmetros.

Cuando el hacha alcanza el árbol se hunde en él. ¿A qué profundidad? A 1 cm. Durante este corto recorrido de 0,01 m, la velocidad del hacha se hace igual á 0, y por lo tanto, gasta toda su energía cinética debido al peso con que cae.

Sabiendo esto, se calcula fácilmente la fuerza con la que el hacha golpea al árbol.

Llamando *F* a esta fuerza, tenemos la ecuación

$$F \times 0{,}01 = 8$$

De ahí resulta que la fuerza $F = 800$ kilogramos.

Esto quiere decir que el hacha que se mueve dentro del árbol tiene una fuerza de 800 kilogramos. ¿Qué tiene de extraño que esta fuerza sea capaz de derribar un árbol, aunque el hacha tenga un peso insignificante?

De esta manera se resuelve el problema de Aristóteles. Pero este problema plantea ante nosotros, un nuevo problema; el hombre no puede derribar al árbol empleando únicamente la fuerza de sus músculos; ¿cómo puede suministrar el hombre al hacha fuerzas que él no tiene? Parte del enigma se explica debido a que el hacha es una cuña, una herramienta que transforma la pequeña fuerza de un trayecto largo en una gran fuerza de un trayecto corto. Pero la causa principal estriba en que la energía adquirida al recorrer un trayecto de 4 metros, se gasta en un trayecto de 1 centímetro. El hacha es una herramienta, aunque no se use como cuña sino como martillo.

Un estudio de esta correlación nos permite comprender por qué la se puede reemplazar un pequeño martillo por una prensa muy fuerte, obteniendo idéntico resultado. Veamos unos ejemplos. Un martillo de 150 toneladas puede reemplazarse por una prensa de 5.000 toneladas; a un martillo de 20 toneladas puede reemplazarse por una prensa de 600 toneladas, etc.

Con base en las mismas causas se explica la acción del sable. Se ve claramente la gran importancia que tiene el hecho de que la acción de las fuerzas se concentre sobre su filo, el cual tiene una superficie muy fina; la presión que recibe cada centímetro cuadrado de este filo es enorme (de miles de atmósferas). Pero también resulta de gran importancia el movimiento realizado para asestar el golpe; el extremo del sable recorre una distancia de 1½ metros, mientras que el cuerpo la víctima se encuentra a pocos centímetros de distancia.

La energía adquirida al recorrer un trayecto de 1½ metros se gasta en un trayecto 10 á 15 veces menor. Por la misma razón, la mano del combatiente refuerza esta correlación de 10 á 15 veces más.

10. El embalaje de las cosas frágiles

Los cuerpos frágiles se embalan con ayuda de paja, viruta, papel, etc. Es bien sabido por qué se hace esto: para evitar las roturas. Pero ¿por qué la paja y la viruta protegen los cuerpos de las roturas? Si nos limitamos a responder sólo lo que se ha preguntado, contestaremos que estos materiales "amortiguan" el golpe cuando se zarandean. Pero es necesario averiguar las causas de este "amortiguamiento".

Hay dos causas. La primera es que el empaque aumenta el área de contacto de los cuerpos frágiles; en caso de choque, los bordes y esquinas más salientes de un objeto son las partes más expuestas. Se rompen con mayor facilidad, que los cuerpos de bordes rectos que tienen una forma lisa y compacta. La presión se distribuye sobre un área mayor y así se reducen los peligros originados por el choque.

La segunda causa ocurre cuando se produce un choque. Si un huevo choca con una vajilla, se detiene bruscamente, porque el choque impide el movimiento. La energía adquirida al moverse, se gasta rápidamente sobre el objeto con el que choca, y el choque casi siempre termina destruyendo los objetos.

Debido a que es muy corto el trayecto en el cual se gasta la energía, la fuerza de compresión es muy grande y su producto por la distancia recorrida, ($F \times S$), da un valor elevado, lo que quiere decir que se genera una enorme energía destructiva.

Figura 63. ¿Para qué se envuelven los huevos con viruta o paja tratando de protegerlos de los golpes?

Ahora comprendemos el efecto de los empaques blandos: prolongan el desplazamiento (S) del efecto de la fuerza (F), y por lo tanto, reducen el aumento de la fuerza de presión (F). Sin un empaque blando que prolongue el movimiento de los objetos, al menos en 1/10 mm, el desplazamiento de dichos objetos resulta demasiado corto, y se puede averiar el vidrio de la vajilla o la cáscara de los huevos, aunque no se lleguen a romper completamente.

La hoja de la paja, la viruta o el papel, entre las diversas partes de la vajilla o entre los huevos que se presionan mutuamente, alargan una docena de veces el camino de las fuerzas que presionan y debilitando al mismo tiempo su intensidad.

Por la razón expuesta se suelen introducir materiales blandos entre los objetos frágiles.

11. ¿Qué es la energía?

Los negros del este de África construyen trampas como las que se muestran en las Figs. 64 y 65.

Figura 64. Trampa de elefantes, similar a las que preparan los habitantes de las selvas africanas

El elefante deja caer sobre su espalda un pesado tronco de árbol en el que se ha clavado un arpón muy afilado, unido a una cuerda suspendida sobre el suelo. Con mayor inventiva se construye la trampa de la Fig. 65: el animal que se enreda en la cuerda, tira la flecha que se hunde en él.

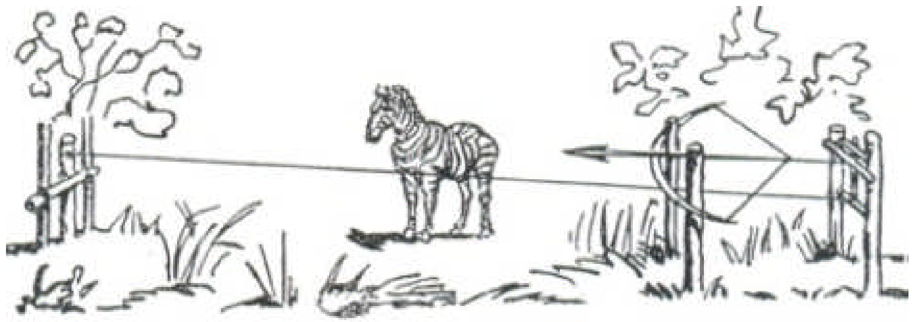


Figura 65. Una trampa que le tira una flecha a la víctima

Es bien sabido de donde proviene la energía que hiere al animal. Se trata de la energía suministrada por el hombre que construye la trampa. El tronco que cae desde lo alto devuelve la energía que empleó el hombre para subirle a esa altura. La flecha que se tira con el arco en la segunda trampa, también almacena la energía que empleó el cazador para estirar la cuerda del arco. En ambos casos los animales se encargan de "liberar" la energía almacenada. Después de liberar la energía, se debe volver a montar la trampa con una nueva carga.

Figura 66. Un oso luchando con una viga suspendida

Sucede todo lo contrario con aquellas trampas de las cuales habla la conocida fábula del oso y la viga. Trepando sobre el tronco de un árbol en el que se encontraba un colmenar, el oso choca con una viga suspendida que le impide trepar más arriba.

El oso empuja el obstáculo, la viga da la vuelta pero vuelve al mismo lugar y golpea fuertemente al animal. El oso empuja otra vez la viga con gran fuerza.

El oso sigue golpeando la viga, cada vez con mayor furia, pero la viga asesta golpes al animal, cada vez más fuertes. Debilitado por la lucha, cae finalmente el oso sobre unas estacas gruesas y afiladas que se encuentran alrededor del árbol.

Esta trampa sencilla no necesita carga. Habiendo debilitado al primer oso, puede terminar con el segundo, el tercero y otros más, sin ninguna participación del hombre. ¿De dónde proviene la energía del golpe que debilita al oso que se encuentra sobre el tronco?

En este caso, el trabajo se produce a costa de la energía del mismo animal. El oso se cansa de luchar con la viga y prepara su propia caída. Empujando la pesada viga, el oso debilita la energía de sus músculos en relación a un aumento potencial de la energía de la viga, que además se transforma en energía cinética debido a la caída de la viga.

Como el oso se encuentra trepado sobre un árbol, tiene que gastar parte de su energía muscular en una energía potencial para sostener a su propio cuerpo y como él se siente debilitado bajo el efecto de la energía del golpe, se ve obligado a caer. En pocas palabras, el oso se golpea, se debilita y cae por su propia cuenta sobre las estacas. Cuanto más fuerte sea el animal tanto mayor es el daño que sufre en esta situación.

12. Los mecanismos que se conducen a sí mismos

Supongo que es conocido por todos, un pequeño aparato llamado: "medidor de pasos".[9]

El podómetro tiene igual tamaño y forma de un reloj de bolsillo y se lleva en el bolsillo para registrar automáticamente los pasos.

---

[9] *Pasómetro* o *podómetro*. Aparato empleado para medir el número de pasos. Sirve de manera indirecta para medir distancia, velocidad y cadencia del caminar de una persona. *(N. del E.)*

En la figura 67 se muestran su forma externa y su mecanismo interno. La parte principal del organismo consiste en el martillo *B* que está sujeto al final de la palanca *AB*, que puede girar alrededor del punto *A*. Normalmente el martillo se encuentra en la posición que indica la figura; sostenido en la parte superior del aparato, por un pequeño muelle. Con cada paso que se da el podómetro sube un poco y baja luego. Sin embargo, debido a la inercia, el martillo *B* no sube al mismo tiempo que el podómetro y en lugar de subir, baja debido a la elasticidad del muelle. Cuando el podómetro baja al dar un paso, por idéntica razón, el martillo *B* sube en vez de bajar. Debido a esto la palanca *AB*, con cada paso que se dé, realiza una doble oscilación, haciendo que el diente mueva la aguja de la esfera y registre los pasos del caminante.

Si se reflexiona sobre la fuente de energía que mueve el mecanismo del podómetro, se deducirá fácilmente que se trata del trabajo muscular del hombre. Pero sería un error pensar que el podómetro no exige al caminante un consumo adicional de energía; el caminante "que sigue su marcha normal", no realiza ningún esfuerzo especial por el hecho de llevar el podómetro. Pero ejecuta un esfuerzo particular, al elevar el podómetro a cierta altura contra la fuerza de gravedad y también contra la elasticidad del muelle que soporta al martillo *B*.

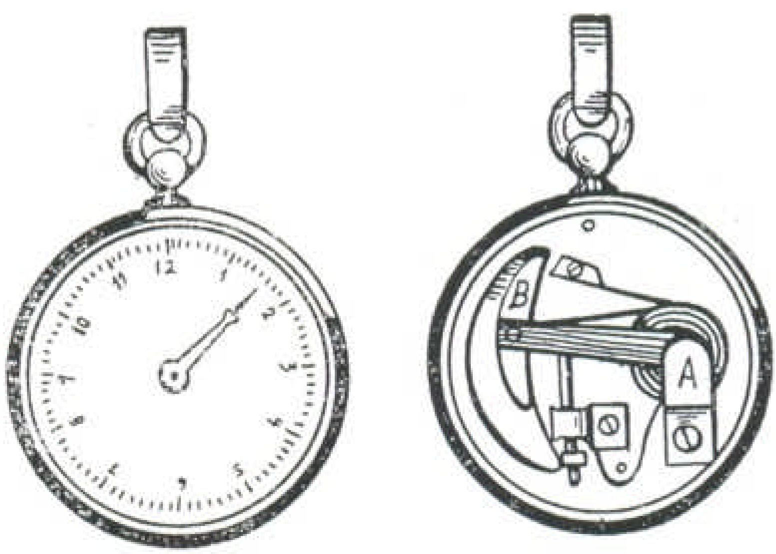


Figura 67. El podómetro y su mecanismo

El podómetro inspiró la idea de construir un reloj de bolsillo que marchara bajo el efecto del movimiento del hombre. Un reloj de este tipo se puede llevar en la muñeca; dicho reloj ajusta sus muelles a medida que se mueve su portador, sin que deba darle cuerda. Basta con llevar este reloj durante varias horas sobre la muñeca, para que reciba más cuerda de la que requiere para funcionar durante veinticuatro horas.[10]

Estos relojes son de mucha utilidad, pues siempre tienen cuerda y funcionan continuamente debido a que los muelles mueven el mecanismo en una misma dirección, lo que garantiza la exactitud de la marcha; además dentro de su maquinaria no hay agujeros en los que se atasque el polvo, impidiendo la marcha del mecanismo y produciendo rozamiento; y lo que es más importante aún: no es preciso preocuparse por darle cuerda al reloj.[11]

¿Se puede pensar que estos relojes no necesitan la energía de sus propietarios para mantenerse en marcha? No, ellos exigen la misma energía muscular que se requiere para poner en marcha un reloj corriente. El movimiento de la mano que lleva el reloj emplea una pequeña cantidad de energía adicional, comparable al movimiento de la mano que da cuerda a un reloj común: una parte de la energía se dispersa, igual que en el caso del podómetro que empuja y mueve el muelle elástico.

Se cuenta que el propietario de una tienda en América "intentó" utilizar el movimiento de las puertas de su tienda, para poner en marcha algunos mecanismos de muelles que empleaba para realizar un trabajo doméstico. El inventor estimó que había encontrado una fuente gratuita de energía porque los compradores "tenían

---

[10] El *reloj automático* posee un mecanismo en el que el resorte se carga moviendo el reloj y no actuando sobre la corona. El primer relojero que quiso dotar un reloj de movimiento perpetuo, fue el inventor suizo Abraham Louis Perrelet (1.729-1.826), quien desarrolló el reloj automático en 1.770, empleando un peso semicircular sin amortiguación, con el centro de oscilación en el centro de la platina del reloj.
Los primeros relojes automáticos de bolsillo se conocían como "relojes de sacudidas", pues se les daba cuerda gracias al movimiento que transmitía la persona al andar.
El inglés John Harwood, fue el primero en fabricar en serie el moderno reloj automático de pulsera. Las empresas suizas Schild y Fortis se encargaron de producirlo y comercializarlo.
Rolex fue una de las primeras empresas en proponer relojes automáticos. Su primer rotor data de 1.931; giraba 360º y se le daba cuerda en un solo sentido.
(N. del E.)

[11] Uno de los lectores de este libro que ha trabajado con relojes de movimiento automático, me informó con referencia a ellos lo siguiente: "Trabajando en el Laboratorio Central Científico Técnico para la construcción de relojes, he recibido de Suiza dos modelos de dos casas comerciales que producen estos relojes en gran cantidad. Se nos había dicho que tales relojes serían muy convenientes para herreros, sastres, pianistas y especialmente para maquinistas, pero que no servían para intelectuales. Con esta suposición nos olvidábamos de una característica muy importante para la marcha de estos relojes: para ponerlos en marcha solo hacía falta un impulso insignificante. Resulta que bastan dos o tres movimientos que impulsen el martillo pesado para realizar el ajuste con mayor rapidez, permitiendo que el reloj marche de tres a cuatro horas". De aquí vemos que para que un reloj de bolsillo trabaje durante todo un día, basta una energía de 0,1 a 0,15 kilográmetros.

que abrir necesariamente las puertas". En realidad, los clientes que abrían las puertas tenían que hacer un esfuerzo adicional para poner en marcha los resortes unidos a ellas. En términos más simples, el propietario de la tienda obligaba a cada uno de sus clientes a trabajar en beneficio suyo.

En los dos casos mencionados, no tenemos que ver con mecanismos de movimiento automático, sino con dispositivos que se ponen en marcha mediante la fuerza muscular del hombre, sin que éste se dé cuenta de ello.

13. La obtención del fuego por medio del frotamiento

Si se juzga por lo que describen los libros, se puede obtener fácilmente el fuego por medio del frotamiento. Sin embargo, no existe gente de raza blanca que conozca este arte.

Escuchemos lo que cuenta Mark Twain[12] sobre sus ensayos para hacer realidad sus grandes conocimientos adquiridos en los libros: "*Cada uno de nosotros agarró dos palos y comenzó a frotarlos uno contra el otro. Al cabo de dos horas, tanto nosotros como los palos, estábamos cubiertos de hielo (esto sucedía en invierno). Maldecíamos fuertemente a los indios, a los exploradores y a los libros que nos habían servido de consejeros*".

Otro escritor americano, Jack London,[13] en su obra: *El lobo de mar*, informó también sobre un fracaso similar.

"*Guardo muchos recuerdos de los fracasos sufridos ensayando este medio sin tener éxito.*

Me acuerdo de un corresponsal de un periódico que viajaba entre Alaska y Siberia. Le encontré una vez en casa de unos amigos donde contó cómo había logrado producir fuego mediante el roce de varios palos. Relató este hecho de un modo muy divertido e inimitable, pareciéndole un acontecimiento nada corriente. Como conclusión dijo:

---

[12] *Mark Twain*, pseudónimo de *Samuel Langhorne Clemens*. (1.835 -1.910). Popular humorista y escritor estadounidense. (*N. del E.)*

[13] *Jack London*. Se cree que su verdadero nombre era *John Griffith Chaney* (1.876 -1.916). Escritor estadounidense, autor de *Colmillo Blanco*, *The Call of the Wild* (traducida en español como *La llamada de lo salvaje* y *La llamada de la selva*), y cincuenta libros más. Su novela *El lobo de mar* se publicó en 1.904. (*N. del E.*)

"Los isleños de los mares del sur posiblemente son capaces de realizar esto; posiblemente también los malayos tienen éxito en estos casos, pero sin duda, esto es superior a las capacidades del hombre blanco".

Julio Verne,[14] en su obra, *La isla misteriosa*, describe casos semejantes de fallos completos.

Aquí relatamos una conversación que tuvo lugar con respecto a esto entre el marinero Pencroff y el joven Harbert:

- "Podríamos hacer fuego como los salvajes, es decir frotando un trozo de madera contra otro".

- "Cómo no, hijo mío, probaremos; pero veremos que con tales medios tú no serás capaz de hacerlo, y además del esfuerzo te brotará sangre de las manos".

- "Sin embargo este medio está muy extendido en las islas del Océano Pacífico".

- "No dudo de ello -contestó el marinero- pero creo que los salvajes deben poseer una capacidad especial para lograrlo. Yo he intentado más de una vez hacer fuego por este medio y decididamente doy preferencia a las cerillas".

"Pencroff -sigue contando Julio Verne- *probó a pesar de esto el hacer fuego por medio del frotamiento de dos trozos de madera seca. Cuando a él y a Nab (un negro) se les habían gastado las energías, la madera apenas estaba un poco caliente; ellos reanudaron su trabajo con fuerzas como para lograr la ebullición de una caldera de un barco trasatlántico. Pero el resultado continuó negativo; el trozo de madera apenas se calentaba incluso menos que las personas que realizaban el experimento"*.

"Después de una hora de trabajo, Pencroff comenzó a enojarse y lanzó el trozo de madera a lo lejos."

"Pronto pasará el invierno y vendrá el calor, entonces averiguaré como logran el fuego los salvajes por este procedimiento -dijo-. Es posible que ellos consigan el fuego por sus amuletos especiales y mandaré al diablo a unos y a otros".

Las causas del fracaso se debieron a que no se habían preparado las cosas como era necesario. Una gran parte de los pueblos primitivos logran el fuego no por el

---

[14] *Jules Gabriel Verne*. (1.828 - 1.905). Escritor francés de novelas de aventuras. Considerado como uno de los padres de la ciencia ficción. Es el segundo autor más traducido de todos los tiempos. Algunas de sus obras han sido adaptadas al cine. Predijo en sus relatos fantásticos algunos avances tecnológicos de la actualidad: la televisión, los helicópteros, los submarinos, las naves espaciales y más. Una de sus novelas más famosas fue *La isla misteriosa*. *(N. del E.)*

simple frotamiento de un palo contra otro, sino por el horadado de la punta de un palo contra otro (Fig. 68).

La diferencia entre estos métodos se explica fácilmente, si analizamos detalladamente el proceso.

Al mover de un lado al otro el palo *CD* sobre el palo *AB*, (Fig. 69), se efectúan dos idas y vueltas de 25 cm cada segundo. Estimamos que las manos presionan los palos con una fuerza de 2 kg. (la cifra elegida es algo arbitraria pero es verosímil).

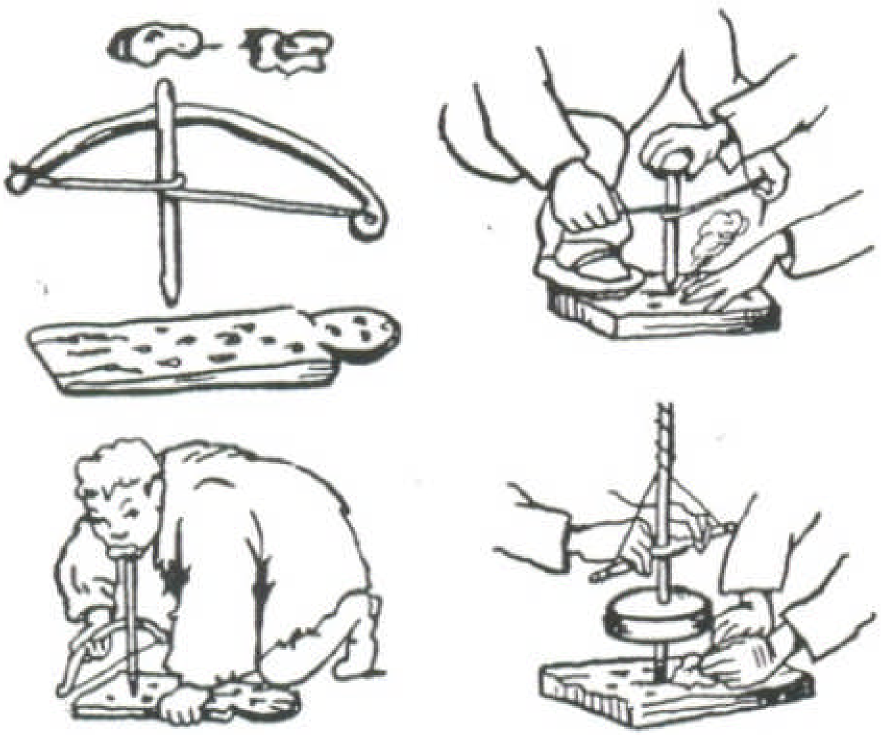


Figura 68. Cómo se obtiene fuego mediante frotamiento

Como la fuerza del fricción de la madera es aproximadamente un 40% de las fuerzas que presionan sobre los trozos que se frotan, la fuerza que obra en este caso es de 2 × 0,4 = 0,8 kg y su trabajo realizado en un espacio de 50 centímetros, es de 0,8 × 0,5 = 0,4 kilográmetros.

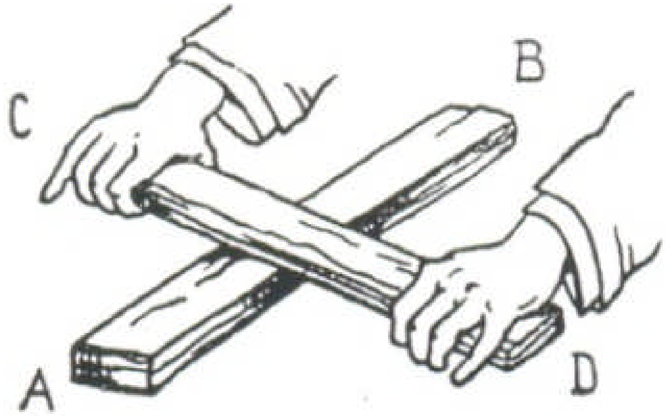


Figura 69. Método libresco para obtener fuego mediante el rozamiento

Si este trabajo mecánico se transformara en calor produciría 0,4 $\times$ 2,3 = 0,92 calorías pequeñas.[15] ¿Hasta qué grado recibe la madera esta cantidad de calor? La madera es un mal conductor del calor, por esto el calor producido por frotamiento penetra muy poco en la madera. El calor penetra la madera hasta una profundidad de 0,5 mm.

El calor actúa en este caso sobre la superficie a lo largo de 50 cm, y se extiende de acuerdo al ancho de la madera. Así por ejemplo, si la madera tiene 1 cm de ancho, el volumen de la madera que se calienta por el calor producido por el frotamiento es

$$50 \text{ cm} \times 1 \text{ cm} \times 0{,}05 \text{ cm} = 2{,}5 \text{ cm}^3.$$

El peso de un trozo de madera de este volumen es de 1,25 gramos. Si el volumen del trozo de madera es de 0,6 cm^3, se calentará

$$\frac{1{,}25 \text{ x } 0{,}6}{0{,}92} = 1 \text{ grado}$$

[15] 1 kilográmetro transformado en calor equivale á 2,3 calorías pequeñas.

Una *caloría pequeña* o *caloría-gramo*, es la energía calorífica necesaria para incrementar un grado centígrado la temperatura de un gramo de agua. Esta definición corresponde a la caloría propiamente dicha y equivale a 4,1868 julios. *(N. del E.)*

Si no se perdiera calor debido al enfriamiento[16], el palo horadado se calentaría a razón de un grado por segundo; pero como el palo se encuentra sometido al enfriamiento del aire, su enfriamiento debe ser notable, por lo tanto, es completamente verosímil la afirmación que hace Mark Twain, de que los palos no sólo no se calentaron por medio del frotamiento sino que incluso estaban cubiertos de hielo. Una cosa muy diferente es taladrar los palos (Fig. 68). Si la punta del palo que gira tiene 1 cm de diámetro, esta punta actúa sobre una un área de 1 cm del otro palo. La oscilación de la unión de los dos palos (dos idas y vueltas por segundo) es de 25 cm y la fuerza que se les aplica con las manos es de 2 kg. El trabajo realizado en un segundo, en este caso, es igual á 0,8 $\times$ 0,5 = 0,4 kilográmetros y la cantidad del calor generado por este trabajo es de 0,92 calorías pequeñas. Pero el volumen de la madera que se calienta es mucho menor que en el primer caso: 3,14 $\times$ 0,05 = 0,15 cm^3 y el peso de la madera es de 0,075 gramos.

Es decir que en el orificio de la madera, la temperatura debe subir teóricamente cada segundo

$$\frac{0{,}92}{0{,}075 \text{ x } 0{,}6} = 20^{o}$$

Solo se puede conseguir este aumento de temperatura, protegiendo del enfriamiento los trozos de madera que se frotan, durante el proceso de taladrado. La madera se inflama a 250º, así que para que los palos comiencen a arder bastarían, aplicando este método, se requieren 250º $\div$ 20º = 13 segundos.

La exactitud de nuestra afirmación se confirma por el testimonio de una auténtica autoridad, el etnólogo alemán, K. Beile, que hizo estudios sobre el fuego producido por el horadado y que descubrió que los negros del centro de África producen el fuego en unos segundos.[17] Además, de todos es conocido, que a veces los ejes de los carros mal engrasados se encienden: este fenómeno se origina en la causa.

---

[16] El lector verá de las siguientes líneas que el resultado varía poco, si el grosor del trozo de madera es algo mayor.

[17] A más de la acción de taladrar, entre los pueblos primitivos se practica también otro método para obtener fuego por medio del frotamiento, con ayuda del "arado de fuego" o también la "sierra de fuego". En ambos casos, la parte de la madera que se enciende, la flor de la madera se encuentra protegida del enfriamiento. El escritor de este libro ha encontrado la descripción más detallada sobre los ejemplos de producir fuego por parte de los pueblos primitivos en el libro del profesor E. Beile, "La cultura de los pueblos no civilizados".

14. La energía trasmitida por un muelle

Si doblamos un muelle de acero, el trabajo que realizamos se transformará en la energía potencial de la tensión del muelle. Si el muelle se endereza, podemos recuperar la energía que empleamos para doblarlo subiendo una carga, moviendo una rueda, etc.

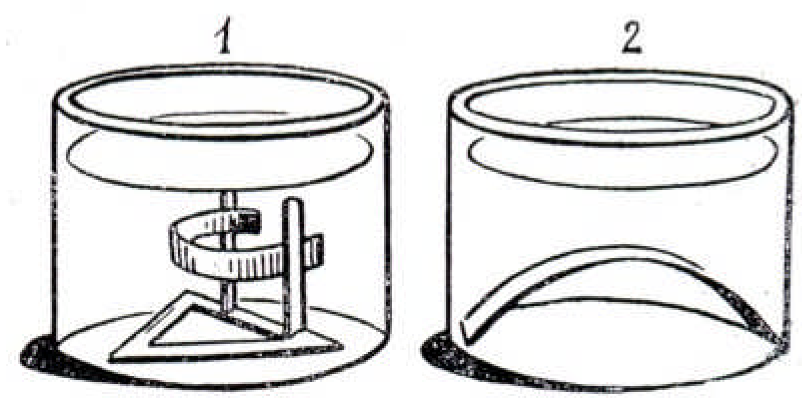
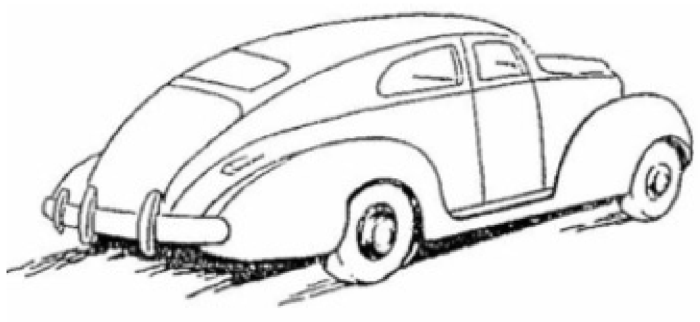


Figura 70. Experimento con un muelle de tensión

Una parte de la energía se transforma en trabajo útil, pero otra parte es absorbida por las resistencias de pérdida (frotamiento). No se pierde ni un solo ergio, pero con un muelle totalmente enrollado podemos obrar de otro modo: si lo sumergimos en ácido sulfúrico la banda de acero se desenrolla, el rollo desaparece ¿adónde va a parar la energía que se empleó al enrollar el muelle? Parece haberse alterado la ley de la conservación de la materia.

¿Es cierto esto? ¿Por qué creemos que desapareció la energía en este caso sin generar ningún efecto?

La energía se conserva en forma de energía cinética hasta el momento en que el muelle se desenrolla al sumergirlo en el ácido, transmitiendo la energía al movimiento.



CAPÍTULO 9
EL ROZAMIENTO Y LOS MEDIOS DE RESISTENCIA

Contenido:

1. En las montañas heladas

Problema

En una montaña helada, por una pendiente de 30º y 12 m de longitud, rueda un pequeño trineo y sigue rodando sobre la superficie horizontal de la sierra.

¿A qué distancia se detiene el trineo?

Solución

Si el trineo se deslizara por la pendiente sin rozamiento, no se detendría nunca. Pero el trineo se mueve con un rozamiento, incluso aunque éste no sea muy grande: el coeficiente de rozamiento de los esquíes del trineo, que son de hierro, sobre la pendiente es igual a 0,02. Por esto el trineo se mueve solamente hasta el momento en que la energía adquirida por el deslizamiento de la montaña, se agote completamente debido a la resistencia del rozamiento.

Para poder calcular la longitud de este trayecto, hay que definir cuánta energía acumula el trineo que se desliza por el monte. La altura *AC* (Fig. 71) desde la cual parte el trineo es igual a la mitad de *AB* (el cateto frente al ángulo de 30º abarca la mitad de la hipotenusa).

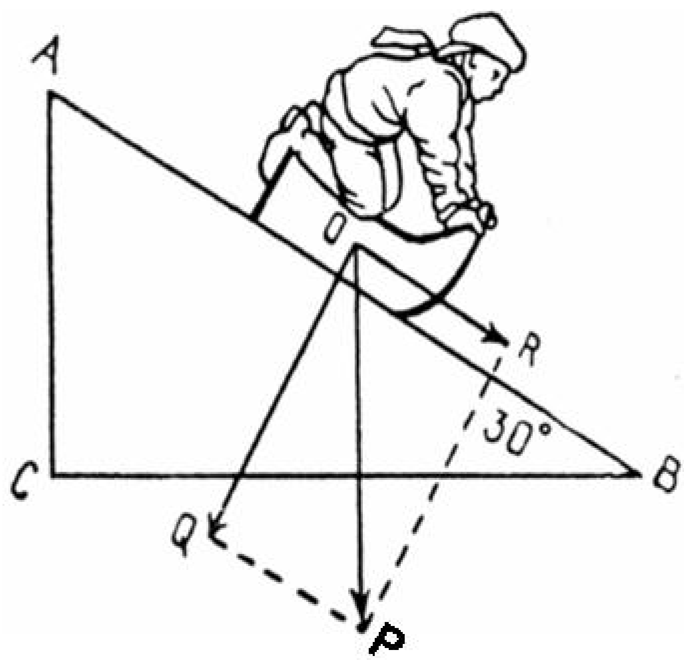


Figura 71. ¿Hasta qué distancia se desliza el trineo?

Esto significa que *AC* = 6 metros. Si el peso del trineo es *P*, entonces la energía cinética adquirida al deslizarse por la pendiente de la montaña es igual a 6*P* kilográmetros, en ausencia de rozamiento. La fuerza de rozamiento equivale a 0,02*Q* Kg, igual a *P*.cos(30º), es decir, 0,87*P*. Por lo tanto, para vencer el rozamiento emplea:

$$0{,}02 \times 0{,}87P \times 12 = 0{,}21P \text{ kilográmetros}$$

la energía cinética que le queda es

$$6P - 0,21P = 5,79P \text{ kilográmetros}$$

Para el recorrido horizontal del trineo, llamamos x la longitud recorrida horizontalmente, el trabajo del rozamiento es $0,02P\,x$ kilográmetros. De la ecuación

$$0,02\,P\,x = 5,79\,P$$

De donde obtenemos que x = 290 metros: el trineo que se desliza por la pendiente de la montaña, avanza sobre la superficie horizontal unos 300 m. hasta detenerse.

2. Con el motor apagado

Problema

Un conductor de un automóvil que se desplaza por una carretera horizontal con una velocidad de 72 kilómetros por hora, apaga el motor. ¿Qué distancia recorre después de apagar el motor si la resistencia al movimiento es del 2%?

Solución

Este problema se resuelve de igual manera que el anterior, pero la acumulación de energía se calcula de otro modo. La energía a, del automóvil en movimiento (sin potencia) es

$$a = mv^2 / 2$$

siendo m la masa del automóvil y v su velocidad. El auto realiza un trabajo hasta detenerse luego de recorrer una distancia x, la fuerza que actúa sobre el auto mientras está en movimiento es el 2% de su peso, P. Entonces tenemos la ecuación:

$$mv^2 / 2 = 0,02\,P\,x$$

Como el peso P del automóvil es igual a mg, siendo g la aceleración de la gravedad, la ecuación queda así:

$$mv^2 / 2 = 0{,}02\ mgx$$

de ahí resulta que la incógnita buscada es:

$$x = 25\ v^2 / g$$

En el resultado final no entra la masa del automóvil, esto quiere decir que la prolongación de la marcha del automóvil, después de apagar el motor, no depende de su masa. Si suponemos que v = 20 m/seg, g = 9,8 m/seg^2, tendremos que la distancia recorrida es de unos 1.000 m; o sea que un automóvil puede recorrer 1 Km por un camino liso, luego de apagar el motor.

3. La rueda del carro

¿Por qué, en la mayoría de los carros, la rueda delantera es mucho menor que la trasera, y por qué el avantrén, respecto a la rueda delantera, no debe acercarse a la caja?

Para poder dar la respuesta correcta debemos hacer la pregunta al revés. No debemos preguntar ¿por qué la rueda delantera es más pequeña? sino ¿por qué la rueda trasera es mayor? Fácilmente se puede comprender por qué la rueda delantera tiene un tamaño tan pequeño; la posición baja del eje de esta rueda da al timón y al tirante una inclinación que facilita al caballo el arrastre por los caminos de herradura.[1]

[1] Los caminos de herradura son caminos que permiten el paso de peatones, recuas de mulas, animales domésticos, vehículos no motorizados. *(N. del E.)*

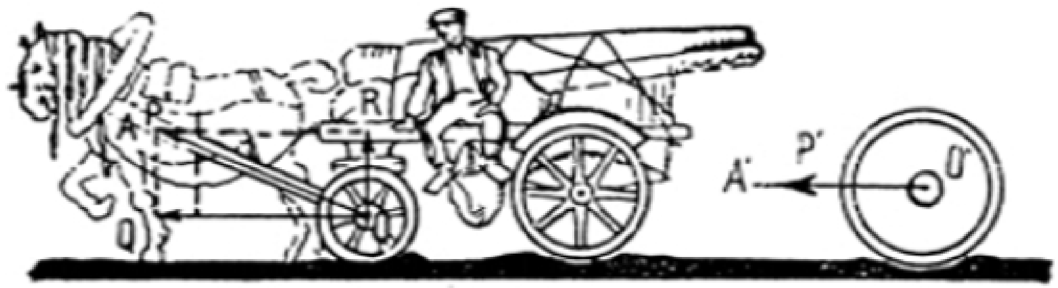


Figura 72. ¿Por qué tiene que ser más pequeña la rueda delantera?

El Fig. 72 muestra que al estar inclinado el timón *AO*, el tiro *OP* del caballo, se descompone en dos fuerzas, *OQ* y *OR*. La componente hacia arriba, *OR*, permite que el carro salga fácilmente de los baches. Si el timón tiene una posición horizontal (Fig. 72, derecha), no se produce esta fuerza hacia arriba, y en este caso resulta difícil el sacar el carros de los baches. Si el carro se desplaza por caminos muy lisos, sin ondulaciones, no necesita que la rueda delantera sea más baja que la trasera.

Pasemos ahora a responder la pregunta del problema: ¿por qué la rueda trasera no tiene el mismo diámetro que la delantera? Esto se debe a que una rueda más grande presenta menos rozamiento.[2] El rozamiento de los cuerpos que ruedan, llamado rozamiento de segunda clase, es inversamente proporcional al radio. Por esta razón resultan de mayor utilidad las ruedas traseras con un diámetro mayor.

4. ¿En qué consiste el consumo de la energía de una locomotora y de un barco de vapor?

El "sentido común" nos dice que la locomotora y el barco de vapor consumen su energía para efectuar su desplazamiento. La locomotora gasta energía, durante los primeros ¾ de minuto, para poner en movimiento al tren. El resto del tiempo (en un trayecto horizontal) solo gasta energía para vencer el rozamiento y la resistencia del aire. Al respecto indica uno de mis conocidos, que se gasta toda la energía de una estación eléctrica de tranvías, para calentar el aire de una ciudad. El trabajo del

---

[2] En teoría se definen tres clases de *rozamiento*:
Clase 1. *Por Deslizamiento*: Cuando un sólido se desliza o intenta deslizarse sobre otro. *Clase 2*. *Por Rodadura*: Cuando un sólido rueda sobre otro sólido. *Clase 3*. *Por Viscosidad*: Cuando la fricción se presenta entre líquidos o gases.
El *rozamiento por deslizamiento*, a su vez, se clasifica en:
1. *Rozamiento Estático*: Se presenta entre superficies que se encuentran en reposo.
2. *Rozamiento Cinético*: Se presenta cuando un cuerpo se mueve respecto al otro.
(N. del E.)

rozamiento se transforma en calor. Esto no afecta el movimiento del tren ya que, después de 10 a 20 segundos de iniciar su recorrido, se mueve por inercia indefinidamente, sin ningún gasto de energía.

Ya hemos hablado antes de que el movimiento continuo se efectúa sin empleo de fuerza, y por lo tanto, sin gasto de energía. Si se presenta una pérdida de energía en un movimiento continuo, se debe a que dicha energía se necesita para vencer los obstáculos que se oponen al movimiento continuo. Sin embargo se requieren las potentes locomotoras para vencer la resistencia del aire. En este aspecto superan a los vehículos de transporte terrestre y su eficiencia es mucho mayor en referencia a la aceleración de la velocidad (proporcional al doble de su potencia). Por esta razón no se puede alcanzar en el agua una velocidad tan alta como la obtenida en tierra.[3]

En América, un tren de 400 toneladas de peso alcanza una velocidad de 90 kilómetros por hora; ningún barco con el mismo peso puede trasladarse a esa velocidad. "*Los remeros*, dice Williams, el autor del libro Aspectos fundamentales, *pueden mover fácilmente una lancha a una velocidad de 6 kilómetros por hora, pero no son capaces de aumentar esta velocidad un kilómetro más pues supera el límite de sus fuerzas. La embarcación más rápida, de regata, se mueve a una velocidad de 20 kilómetros por hora, pero para lograr esta velocidad hace falta un equipo especialmente entrenado de ocho personas, que remen con todas sus fuerzas*".

Si la resistencia del agua al movimiento, crece rápidamente al aumentar la velocidad, la fuerza de arrastre del agua aumenta rápidamente su velocidad. Sobre esto hablaremos luego en más detalle.

5. Piedras arrastradas por el agua

Lavando y royendo sus bordes, un río traslada los restos de los lugares por donde ha pasado a otras partes de su lecho. Por el fondo del lecho de un río ruedan a veces piedras bastante grandes, y esta enorme fuerza del agua sorprende a muchas personas.

Es realmente asombroso ver cómo el agua puede arrastrar piedras de este tamaño, aunque bien es cierto, que esto no sucede en todos los ríos. Los ríos que corren por

[3] Esto no se relaciona con las embarcaciones conocidas como *deslizadores*, que se deslizan sobre el agua casi sin sumergirse en ella, a los cuales el agua les ofrece una resistencia mínima, y desarrollan una gran velocidad.

las llanuras, con corrientes lentas, solo arrastran guijarros pequeños. Pero basta una ligera aceleración para que la potencia de arrastre de la corriente aumente enormemente. Al duplicar su velocidad, el río no sólo llevará guijarros pequeños sino que arrastrará piedras más grandes. Las corrientes de los ríos de montaña que corren con gran velocidad, arrastran pedernales de un kilogramo o más. ¿A qué se debe este fenómeno?

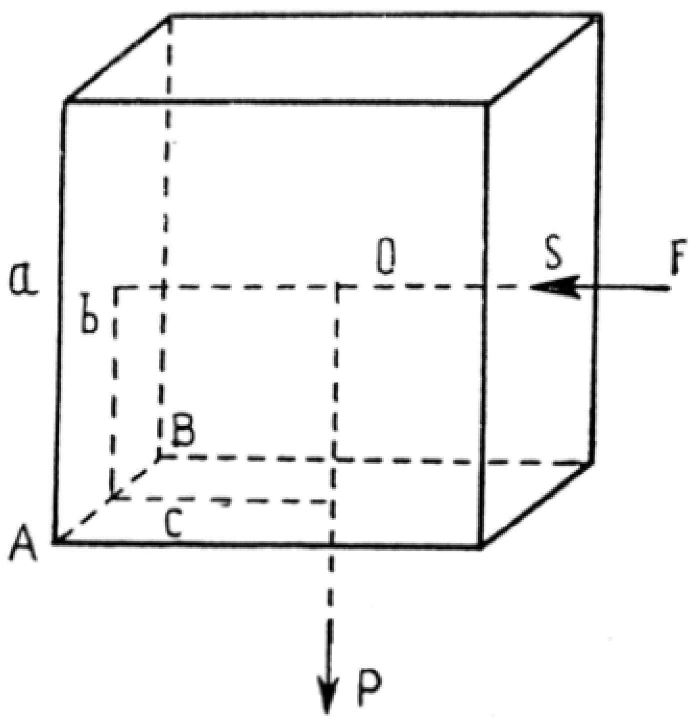


Figura 74. La fuerza que actúa en la piedra, en el fondo del agua

Se trata en este caso de los interesantes efectos de las leyes de la Mecánica conocidas en Hidrología con el nombre de "ley de Eri". Esta ley establece que al aumentar n veces la velocidad de la corriente, el río puede arrastrar material n^6 más pesado.

Averigüemos, por qué existe aquí una proporcionalidad de 6 grados, a pesar de que esto sucede raras veces en la naturaleza.

Para el observador corriente se muestra una piedra en forma de cubo, con un lado *a* (Fig. 74), en el fondo del río. Sobre su cara *S* obra la fuerza *F* correspondiente a la presión de la corriente de agua. Esta fuerza trata de girar al cubo alrededor de su arista *AB*. La fuerza *P*, correspondiente al peso del cubo en el agua, impide que la piedra se mueva alrededor de dicho borde. Por lo tanto, la piedra queda en posición de equilibrio; según los principios de la Mecánica, se establecen los "momentos", relaciones entre cada una de las fuerzas *F* y *P* con el eje *AB*. El "momento" de cada fuerza es igual al producto de la magnitud de dicha fuerza por su distancia al eje. Para que la piedra permanezca en equilibrio los momentos de estas fuerzas deben ser iguales. Con la piedra en equilibrio se tiene el "momento" es F_e para la fuerza *F*, y el "momento" es P_e para la fuerza *P* (Fig. 74). Por lo tanto, la piedra queda en posición de reposo cuando

$$b = c = a/2$$

$$F_e \leq P_e$$

$$F \times a/2 \;\leq\; P \times a/2$$

es decir, cuando

$$F \leq P$$

Además,

$$Ft = mv$$

donde *t* indica la duración del efecto de las fuerzas, *m*, la masa de agua que participa en la presión en *t* segundos y *v* la velocidad de la corriente.

La masa de agua, *m*, que presiona en *t* segundos sobre la cara *S*, es

$$m = Svt = a^2vt$$

Lo que quiere decir que

$$Ft = mv = (a^2vt)v = a^2v^2t$$

De donde:

$$F = a^2v^2$$

El peso P del cubo en el agua es igual a su volumen (a^3), multiplicado por el peso específico d de la materia que lo compone, menos el peso de este volumen en el agua (principio de Arquímedes).

$$P = a^3d - a^3 = a^3 (d - 1)$$

La condición del equilibrio $F \leq P$ se transforma en

$$a^2v^2 \leq a^3 (d - 1)$$

de esto resulta que:

$$a \geq v^2 / (d - 1)$$

La arista del cubo, a, puede resistir a la fuerza de la corriente, cuya velocidad es v, proporcional a la segunda potencia de la velocidad, v^2. El peso del cubo es proporcional, como bien sabemos, a la tercera potencia de su arista, a^3. De ahí resulta que el peso del agua que arrastra una piedra en forma de cubo aumenta en la sexta potencia de la velocidad de la corriente, según la fórmula

$$(v^2)^3 = v^6$$

En esto consiste la "ley de Eri", la hemos visto aplicada a una piedra de forma cúbica, pero fácilmente se puede aplicar a cuerpos de cualquier forma.

Para comprobar esta ley imaginemos tres ríos; la velocidad del segundo río es dos veces mayor que la velocidad del primero, y la del tercero es dos veces mayor que la del segundo. En otras palabras, sus velocidades guardan la relación 1:2:4. Según la ley de Eri, el peso de las piedras que pueden arrastrar estas corrientes, corresponde a la relación $1^6:2^6:4^6 = 1:64:4096$. Por esto si un río tranquilo sólo arrastra guijarros cuyo peso es de ¼ de gramo, un río dos veces más veloz puede arrastrar piedras de 16 gramos, y los ríos de montaña que corran con una velocidad dos veces mayor, son capaces de arrastrar piedras de un peso de más de 1 kilogramo.

6. La velocidad de caída de la lluvia

Las líneas curvas de los hilillos de lluvia en las ventanas de cristal de un vagón en movimiento, son testigo de algunos fenómenos notables.

Aquí se efectúa la conjunción de dos movimientos según la regla del paralelogramo, porque las gotas de la lluvia que se deslizan hacia abajo, se encuentran simultáneamente bajo el efecto del movimiento del tren y el efecto del movimiento de su propia caída. El movimiento del tren se efectúa siempre en línea recta. Como una de las componentes del movimiento (el movimiento del tren), es constante, la Mecánica establece que la otra componente del movimiento, es decir, la caída de las gotas de agua, también debe ser constante. Se obtiene un resultado es inesperado: ¡los cuerpos que caen se mueven a la misma velocidad! Esto parece una paradoja. Este resultado es valedero debido a que las gotas de agua que caen trazan líneas rectas en las ventanas de vidrio del tren, ya que si las gotas de la lluvia aceleraran al caer, describirían líneas curvas (similares al arco de una parábola).

Figura 75. Las huellas de las gotas de lluvia en la ventana de un vagón

Por esta razón, las gotas de la lluvia no caen con una aceleración como sucede con las piedras al caer, sino que caen a velocidad constante. Esto se debe a que la resistencia del aire anula completamente las fuerzas que producen la aceleración. De no ser así, el aire no retendría la caída de las gotas de lluvia, resultando estas gotas bastantes peligrosas para nosotros. Las nubes de lluvia se descargan a veces desde una altura de 1 á 2 kilómetros; si cayeran las gotas de agua desde una altura de 2.000 metros sin encontrar resistencia, chocarían contra la superficie de la tierra con una velocidad de

$$v = \sqrt{2gh} = \sqrt{2 \text{ x } 9{,}8 \text{ x } 2.000} \approx 200 \text{ m/s}$$

Esta velocidad corresponde a la de una bala de cañón. Aunque las gotas no sean de plomo sino de agua, lo que quiere decir que poseen una energía cinética 10 veces menor que la de una bala de cañón, podemos imaginar la fuerza del golpe de una gota de agua en estas condiciones.

¿Con qué velocidad llega realmente la gota de agua a la tierra?

Podemos calcularla con bastante precisión, porque la gota de agua se mueve a velocidad constante.

La resistencia que presenta el aire a los cuerpos que caen, no es constante durante la caída. Aumenta a medida que crece la velocidad de la caída.

Al comienzo de la caída, la velocidad es insignificante,[4] por lo tanto, se puede despreciar la resistencia del aire. A medida que aumenta la velocidad de la caída, crece también la resistencia, impidiendo así el aumento de velocidad.[5] La caída se inicia con una ligera aceleración, aunque su valor es menor que la de una caída libre, sin resistencia.

Peso de la gota (mg)	0,03	0,05	0,07	0,10	0,25	3,00	12,4	20,0

[4] Así modo de ejemplo, durante las primeras décimas de segundo, los cuerpos que caen libremente, avanzan cinco centímetros.

[5] Cuando aumenta la velocidad desde unos pocos metros por segundo hasta 330 metros por segundo (velocidad del sonido), la resistencia del aire aumenta proporcionalmente al cuadrado de la velocidad.

Radio (mm)	0,20	0,23	0,26	0,29	0,39	0,90	1,40	1,70
Velocidad (m/s)	1,7	2,0	3,5	2,6	3,3	5,6	6,9	7,1

Luego va disminuyendo la aceleración cada vez más, y por último se hace igual a cero: desde este momento el cuerpo se mueve sin aceleración, es decir de un modo constante, a una velocidad proporcional a su peso. Y como la velocidad es constante, la resistencia también es constante; el movimiento continuo no sufre variaciones de velocidad, no se acelera ni se frena.

Esto quiere decir que el cuerpo que cae en el aire debe moverse a velocidad constante, cuya magnitud depende de su peso, excepto al momento de iniciar la caída. Este momento llega rápidamente para la gota de agua que cae. La medida de velocidad de la gota de agua, demuestra que esta tiene poco peso, tratándose especialmente de cosas pequeñas. Las gotas de 0,03 mg tienen una velocidad de 1,7 m/seg, las gotas de 20 mg tienen una velocidad de 7 m/seg; pero las gotas más grandes con un peso de 200 mg, alcanzan una velocidad de 8 m/seg; no se han detectado velocidades mayores.

Veamos una forma muy ingeniosa para medir la velocidad de las gotas de agua. El dispositivo (Fig. 76) se compone de dos discos herméticamente unidos a un eje vertical. El disco superior tiene una abertura en forma de triángulo alargado. El dispositivo se lleva bajo la lluvia en la misma forma que se lleva un paraguas. Luego se le gira rápidamente para recoger el agua. Las gotas de la lluvia pasan por la abertura y caen sobre el disco de abajo que contiene papel secante. Durante el tiempo en que viajan las gotas entre los dos discos, se desvían de la abertura en algunos grados, y así las gotas tocan el círculo inferior, de manera no completamente vertical sino con una ligera desviación; así por ejemplo, si la señal de la gota se encuentra distanciada de la abertura una 20^{ava} parte de la circunferencia, y el círculo da 20 vueltas/minuto, siendo además, la distancia entre los círculos de 40 cm; con base en esta velocidad, se calcula fácilmente la velocidad de caída de las gotas de agua: para recorrer la distancia entre los dos círculos (0,4 metros), las gotas necesitan el tiempo en el cual el disco que da 20 vueltas/minuto, da una 20^{ava} parte de la vuelta. Este intervalo de tiempo es igual a

$$1/20 \div 20/60 = 0{,}15 \text{ segundos}$$

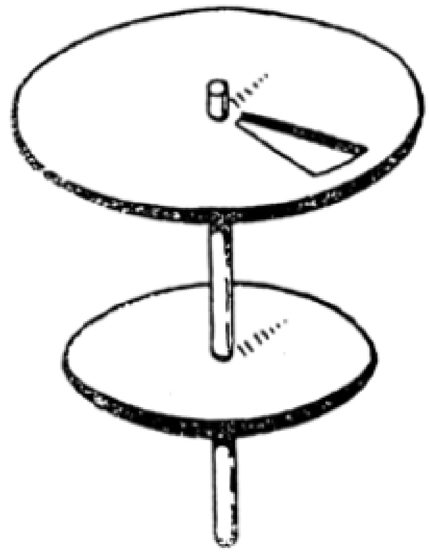


Figura 76. Dispositivo para medir la velocidad de la lluvia

En 0,15 segundos la gota avanza 0,4 metros; esto quiere decir que la velocidad de caída de la gota es igual a

$$0,4 \div 0,15 = 2,6 \text{ m/seg}$$

(Se comprueba la precisión del cálculo, midiendo la velocidad de una bala).

Para calcular el peso de la gota, es necesario medir las manchas húmedas que se producen en el papel secante, debido a la caída de las gotas de agua. Se puede calcular con exactitud cuántos miligramos de agua absorbe un centímetro cuadrado de papel secante.

El granizo cae con mayor velocidad que las gotas de lluvia. Esto no se debe a que el granizo sea más compacto que el agua (al contrario, el agua es más compacta que el granizo), sino a que el granizo tienen un mayor tamaño. Pero también el granizo cae cerca de la tierra con una velocidad proporcional al tamaño de cada pedrisco.

Incluso algunos cascos de metralla, que caen desde los aviones (cascos de metralla o balas de fusil con un diámetro aproximado de 1,5 cm), caen a la tierra con una velocidad proporcional a su tamaño, bastante lenta; por esto representan poco peligroso, sin llegar siquiera a agujerear un sombrero blando. Sin embargo, una pequeña flecha de acero que caiga desde una determinada altura, se convierte en un arma terrible, que puede atravesar longitudinalmente el tronco de un hombre, de lado a lado. Esto se debe a que a 1 cm^2 de la sección transversal de la flecha, le corresponde una masa mayor que la de una bala redonda; por eso dicen los artilleros, que la "carga transversal" de la flecha es más efectiva que la de la bala, debido a que la flecha vence fácilmente la resistencia del aire.

7. El enigma de la caída de los cuerpos

Un fenómeno tan conocido como la caída de los cuerpos, nos proporciona ricas enseñanzas de a constante investigación acerca de los fenómenos cotidianos y científicos. Las personas que no conocen la Mecánica están convencidas de que las cosas pesadas caen con mayor rapidez que las livianas. Este concepto, desarrollado por Aristóteles y compartido por todo el mundo durante muchos siglos, fue refutado en el siglo XVII por Galileo, el creador de la Física contemporánea. El genial avance del pensamiento de este gran físico se aprecia en las siguientes líneas: "*Sin tener pruebas y por un camino corto, haciendo observaciones convincentes, podemos decir con absoluta certeza que no es correcto afirmar que los cuerpos más pesados se muevan con mayor rapidez que los cuerpos más livianos, suponiendo que los cuerpos se componen del mismo material... Si tenemos dos cuerpos que caen a diferente velocidad, y comparamos el cuerpo que se mueve más rápido con el que se mueve más lento, queda claro que el cuerpo que cae con mayor rapidez no se frena durante su caída, y que el cuerpo que cae más lento tampoco se acelera a medida que baja. Si esto es así, también es cierto que una piedra que cae, por ejemplo, a una velocidad de 8 "grados" (unidad para medir velocidades), en cuanto se ata a una piedra menor con una velocidad de 4 grados, se debe esperar que las dos piedras unidas caigan a una velocidad inferior á 8 grados; a pesar de que las dos piedras unidas forman un cuerpo mayor que el cuerpo inicial cuya velocidad era de 8 grados; se ve claramente que este cuerpo, más pesado que cada uno de los cuerpos que lo conforman, se mueve con menos velocidad que el que cae a 8 grados, cuerpo más liviano que él, pero esto es contrario a nuestra hipótesis. Como pueden ver, en lugar de concluir que el cuerpo más pesado se mueve con mayor* *velocidad que el más liviano, yo puedo sacar la conclusión de que el cuerpo más pesado se mueve con menos velocidad.”*

Ahora sabemos a ciencia cierta que en el vacío todos los cuerpos caen con idéntica velocidad y que la causa que provoca la diferencia de velocidad de la caída de los cuerpos en el aire, es su resistencia. Aquí, no obstante, surge la siguiente duda: la resistencia que ofrece el aire al movimiento sólo depende del tamaño y de la forma del cuerpo; por esto se puede decir, que dos cuerpos, iguales en tamaño y forma, pero diferentes en peso, deben caer con la misma velocidad; esta velocidad, diferente de la que tiene en el vacío, debe reducirse por igual para ellos, bajo la acción de la resistencia del aire. Un globo de hierro y otro de madera del mismo diámetro deben caer con la misma velocidad de acuerdo a lo expuesto. Utilizamos mentalmente el túnel de viento (capítulo 1) introduciendo en él unas plomadas, suspendidas de dos globos, uno de hierro y otro de madera, ambos del igual tamaño, aplicándoles por debajo una corriente de aire.

En otras palabras, “reproducimos” la caída del cuerpo en el aire: ¿cuál de los dos globos ascenderá con mayor rapidez, al ser empujado por las corrientes de aire? Es claro que mientras actúe la misma fuerza sobre ambos globos, éstos adquieren diferente aceleración: el globo más ligero tendrá mayor aceleración (según la fórmula $f = ma$).

Aplicando esto al fenómeno descrito, una vez lleguen arriba los globos, se verifica su caída. Vemos que el globo más ligero se queda atrás del más pesado. En otras palabras, el globo de hierro debe caer por el aire con mayor rapidez que el globo de madera, a pesar de ser idénticos en forma y tamaño. Esto explica entre otras cosas, por qué razón, el artillero da una importancia tan grande a la “carga transversal” de su arma, es decir, aquella parte de la masa que tiene que enfrentar cada cm^2, a la resistencia del aire.

8. La corriente se efectúa abajo

Estoy convencido de que para muchos es completamente nuevo y sorprendente el hecho de que los cuerpos que nadan a través de la corriente de los ríos, presenten características parecidas a las de los cuerpos que caen por el aire. Es grato pensar que una barca que navega por un río, sin remos ni velas, flota sobre el río gracias a la corriente de éste. Pero esta suposición es errónea: la barca se mueve más veloz que la corriente, tanto más veloz cuanto más pesada sea. Este fenómeno es bien conocido por los navegantes expertos pero casi ignorado por muchos físicos. Debo confesar que yo mismo, no supe esto hasta hace poco tiempo.

Examinemos detalladamente estos fenómenos paradójicos. A primera vista representan algo incomprensible: ¿cómo puede nadar una barca por la corriente, empujada por algo inexistente en el agua? Hay que tener en cuenta que el río no lleva al barco como una banda transportadora que arrastra los cuerpos montados sobre ella. El agua del río es un plano inclinado por el que se deslizan los cuerpos con movimiento acelerado; el agua, sin embargo, debido al roce sobre el lecho, crea un movimiento uniforme. Claro que inevitablemente llega el momento en que el barco que nada con un movimiento acelerado, avanza más que la corriente del río. En este momento el agua frenará el movimiento del barco, igual que el aire retarda la caída de los cuerpos que lo atraviesan.

En resumen, los cuerpos que flotan en el agua se comportan de igual manera que los cuerpos que se mueven por el aire, alcanzando un límite de velocidad que no pueden rebasar. Cuanto más livianos son los cuerpos que se deslizan por el agua, tanto más rápido alcanzan esta velocidad límite, y recíprocamente, tanto menos velocidad poseen los cuerpos pesados empujados por la corriente, cuanta mayor velocidad adquieren al final.

De ahí se deduce, por ejemplo, que los remos que están colgados de los costados de la barca, deben quedarse detrás de la barca ya que ellos son mucho más ligeros que ésta, y si la barca y los remos se deslizan por ríos con corrientes más rápidas, la barca más pesada se adelantará mucho más a los remos más livianos. Así sucede en realidad, especialmente en los ríos con corrientes rápidas.

Tengo la posibilidad de ilustrar el concepto ahora expuesto repitiendo una interesante conversación que tuvo uno de mis lectores con el físico B. Y. de Leningrado, y que ha tenido la gentileza de transmitirme:

"*Yo participé en una excursión en las montañas Altai, y allí tuve necesidad de bajar por el curso del río Bii, desde su nacimiento en el lago Teleskov hasta la ciudad de Biiska, durando esta bajada cinco días. Durante la expedición uno de los* *excursionistas dijo a los remeros que le parecía que éramos demasiados en la barca*".

- *"No importa, nos contestó el más viejo, así bajaremos más rápido".*

- *¿Cómo? ¿Es que no vamos con la misma velocidad que la corriente? dijimos.*

- *"No, vamos más rápidos que la corriente; cuanto más pesada sea la barca más rápidamente se desliza".*

"No le creíamos. Entonces el más viejo nos propuso, según íbamos navegando, echar una gorra al agua, para que lo comprobáramos, y confirmamos que la gorra quedó muy pronto detrás de nosotros".

Pudimos comprobar la veracidad de lo dicho por el viejo mediante un hecho de mayor trascendencia.

"En un lugar del río caímos en un remolino. Dimos muchas vueltas sin que lográramos salir de él. Al principio se nos cayó un martillo de madera al agua, y se alejó rápidamente (porque había desaparecido el remolino en la superficie del río)". J. P.

-*"No importa -dijo el viejo-, le alcanzaremos pronto. Nosotros tenemos más peso".*

"Y aunque nos quedamos durante algún tiempo en el remolino, se cumplió lo que dijo el viejo."

"En otro lugar divisamos nos encontramos con otra lancha, más ligera que la nuestra (sin pasajeros), y rápidamente la alcanzamos y sobrepasamos."

9. Cuando cae una lluvia fuerte

Problema

En este capítulo hemos hablado mucho sobre la caída de las gotas de lluvia. Por esto, para concluir, proponemos al lector un problema que aunque no se relaciona directamente con el tema principal, está estrechamente ligado con la mecánica de la caída de la lluvia.

A simple vista, la tarea parece muy fácil, pero es bastante instructiva para finalizar este capítulo.

Si cae una lluvia vertical ¿cuándo se mojarán más nuestros sombreros, si nos quedamos sin movernos en el mismo lugar o si nos movemos rápidamente bajo la lluvia de un lugar a otro?

El problema se resuelve fácilmente si lo planteamos de otra forma.

La lluvia cae vertical. ¿En qué caso cae más agua sobre el techo de un vagón, cuando el vagón está en reposo o cuando está en movimiento?

He planteado este problema de ambas maneras a personas que se ocupan de la Mecánica y he obtenido respuestas contradictorias. Unos aconsejan, para no desgastar el sombrero, quedarse quietos durante la lluvia, mientras que otros, por el contrario, recomiendan correr lo más rápido posible.

¿Cuál de las dos respuestas es la mejor?

Solución

Miremos el problema según su segundo planteamiento, es decir, en relación al techo del vagón.

Si el vagón no se mueve, la cantidad de lluvia que cae sobre su techo en un segundo, es igual al número de gotas de agua que caen sobre el prisma de sección *S*, correspondiente a la superficie del techo del vagón y *H*, es igual a la velocidad de las gotas que caen perpendicularmente (Fig. 77).

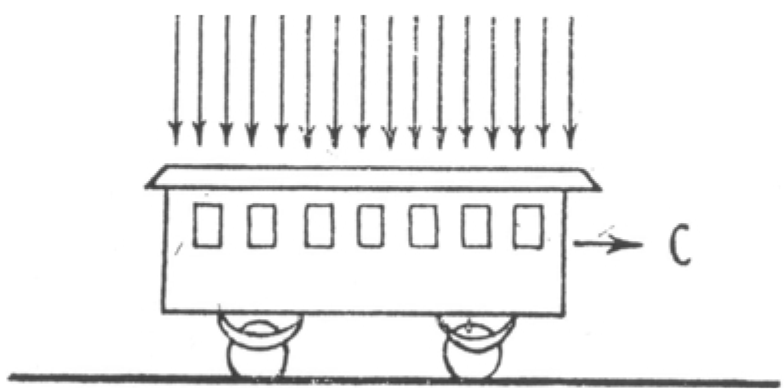


Figura 77. La lluvia cae perpendicularmente sobre el vagón en reposo.

Resulta difícil calcular la cantidad total de agua que cae sobre el techo del vagón en movimiento. Procedamos del modo siguiente: imaginémonos que las gotas de agua que caen, tanto sobre el vagón en movimiento como en los alrededores, se mueven respecto a la tierra, en dirección opuesta al movimiento del vagón. Si el vagón se encuentra en reposo en relación a la tierra, las gotas de lluvia realizan dos movimientos en relación al vagón en reposo: la caída perpendicular y la desviación horizontal cuando alcanzan el vagón. La velocidad resultante de estos dos movimientos va en diagonal respecto al techo del vagón; en una palabra, el vagón se encuentra exactamente bajo las gotas de lluvia que caen diagonalmente sobre él(Fig. 78).

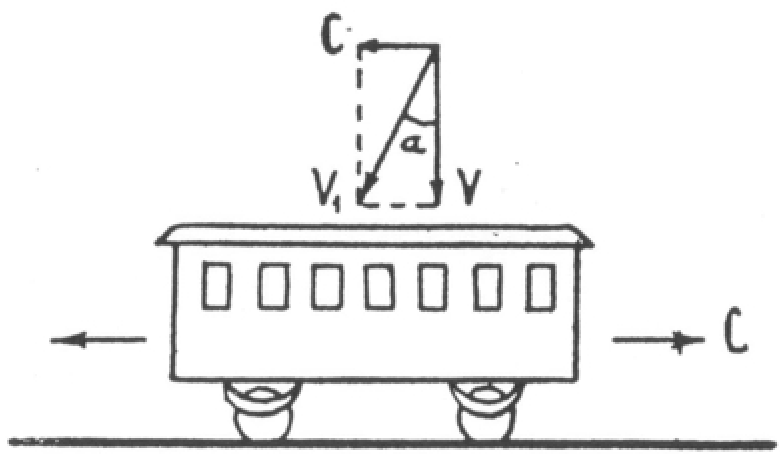


Figura 78. La misma lluvia, cayendo sobre el vagón en movimiento

Ahora queda claro que el conjunto de las gotas que caen por segundo sobre el techo del vagón, forman un prisma de sección S_1, que se orienta perpendicularmente a la lluvia, y la altura H_1 es igual a la velocidad del movimiento de las gotas.
La relación de la sección del prisma (Fig. 78) es

$$H_1 : H = V_1 : V = 1 / cos(\alpha)$$

La relación de la altura del prisma es (Fig. 79)

$$S_1 : S = AC : AB = cos(\alpha)$$

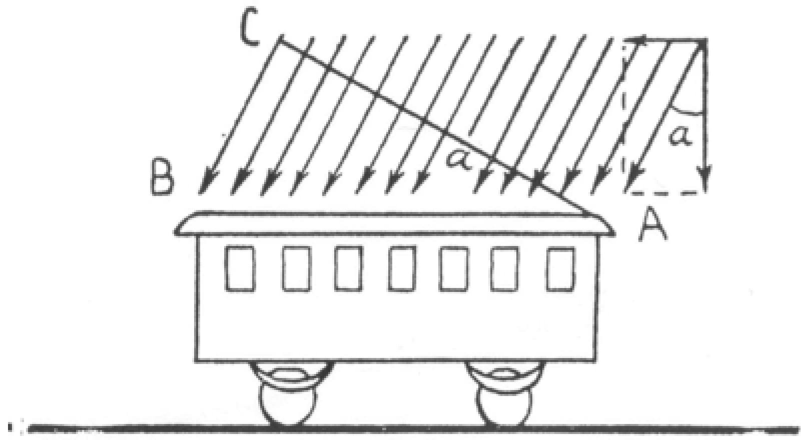
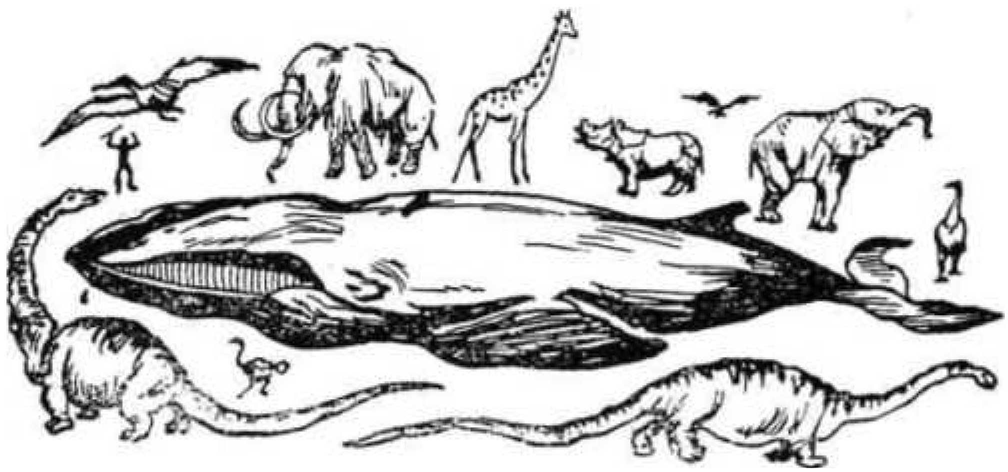


Figura 79. La lluvia cae diagonalmente sobre un vagón en movimiento

De acá se puede calcular la cantidad de agua de la lluvia que cae sobre el tren:

$$Q_1 : Q = S1 \times H_1 : S \times H = \cos(\alpha) \times 1 / \cos(\alpha) = 1$$

En ambos casos cae el agua de la lluvia en igual cantidad. Por lo tanto, nuestros sombreros se mojarán lo mismo si nos quedamos quietos bajo la lluvia o si corremos todo lo que más podamos bajo ella, durante largo tiempo.



CAPÍTULO 10
MECÁNICA DE LA NATURALEZA VIVA

Contenido:

1. Gulliver y los gigantes

Si lees en los Viajes de Gulliver,[1] que los gigantes son doce veces mayores que los hombres de estatura normal, te imaginas cuántas veces superan en fuerza a los hombres normales.

El mismo autor de las Aventuras dota a sus “gigantes” de fuerzas legendarias. Pero esto es completamente falso y contradictorio con las fuerzas de la Mecánica. Resulta fácil comprobar que los gigantes no sólo no pueden ser doce veces más fuertes que las personas normales, sino que por el contrario, deben ser ese número de veces más débiles.

Ante nosotros vemos de pie a Gulliver y al gigante 12 veces mayor que él. Ambos levantan sus manos derechas. El peso de la mano de Gulliver es igual a p, y el de la del gigante igual a P. El primero alza el centro de gravedad de su mano a la altura h, y el segundo a la altura H. Esto quiere decir que Gulliver realiza un trabajo ph, y el gigante un trabajo PH. Buscamos la relación entre ambas cantidades. El peso P de la mano del gigante es tantas veces mayor que el peso p de la mano de Gulliver cuantas veces mayor es su tamaño, es decir, 12^3. La altura H es 12 veces mayor a la altura h. Así pues

$$P = 12^3 \times p$$

$$H = 12 \times h$$

De ahí resulta que $PH = 12^4\ ph$, es decir, que al subir la mano el gigante debe realizar un trabajo 12^4 veces mayor que un hombre de tamaño normal. Por lo tanto, ¿tiene el gigante una mayor capacidad de trabajo? Para efectuar el cálculo se deben comparar las fuerzas musculares de ambos seres, y previamente quiero referirme aquí a una parte de un curso de Fisiología.[2]

---

[1] *Los Viajes De Gulliver* es una novela de Jonathan Swift, publicada en 1.726. Aunque se le considera con frecuencia una obra infantil, en realidad es una sátira feroz de la sociedad y la condición humana, camuflada como un libro de viajes por países pintorescos (género bastante común en la época).
Existe una serie animada producida por Hanna-Barbera Productions, basada en la novela satírica *Los Viajes De Gulliver*, conocida como *Las Aventuras De Gulliver*. La serie se emitió en los Estados Unidos, a través del canal de televisión ABC, cada sábado, desde el 14 de septiembre de 1.968 hasta el 5 de septiembre de 1.970. Las *Aventuras de Gulliver* tuvo 17 episodios. *(N. del E.)*

[2] “*Manual de Fisiología*”, publicado en 1.876; su autor es *Sir Michael Foster* (1.836 - 1.907), fisiólogo y naturalista británico. *(N. del E.)*

"Cuando se tienen músculos con fibras paralelas, la altura hacia la cual pueden subir una carga depende de la longitud de dichas fibras, y el peso que puede tener dicha carga, depende de la cantidad de fibras y del modo como se distribuye la carga entre ellas. Por esta razón, entre dos músculos de igual longitud y capacidad, puede realizar más trabajo el que posea mayor sección de área transversal; pero entre dos músculos con idéntica sección de área transversal, puede realizar más trabajo el más largo de ellos. Si comparamos dos músculos de diferente longitud y sección de área transversal, podrá realizar un mayor trabajo, el que posea mayor volumen, es decir, el que tenga mayor número de unidades cúbicas".

Si aplicamos lo antedicho a nuestro caso, concluimos que la capacidad productiva del trabajo del gigante debe ser 12^3 veces mayor que la de Gulliver (con relación a los músculos de ambos). Si indicamos la capacidad de trabajo de Gulliver con w, y la del gigante con W, tenemos la relación

$$W = 12^3 w$$

Esto quiere decir que alzando su mano, el gigante debe realizar un trabajo 12^4 veces mayor que Gulliver, pero la capacidad de trabajo de sus músculos sobrepasa a la de Gulliver sólo en 12^3. Queda claro que a él le resulta 12 veces más difícil realizar sus movimientos que a Gulliver. En otras palabras, el gigante es 12 veces más débil que Gulliver; por lo tanto el gigante no se pude reemplazar por un ejército de 1.728 soldados normales (es decir 12^3), sino por 144 (es decir 12^2).

Si Swift tuvo el deseo de que sus gigantes fueran tan libres en sus movimientos como los hombres de estatura normal, debió dotarles de músculos "enormes" cuyo volumen fuera 12 veces mayor de lo que exige la proporcionalidad. Para esto deben tener un diámetro $\sqrt{12}$ mayor, es decir, 3½ veces más que los del cuerpo de un hombre de una estatura normal. En este caso los huesos que tienen que soportar unos músculos tan grandes deben ser extraordinariamente macizos. ¿Pensó Oliver Swift en que sus gigantes debían parecer más bien hipopótamos debido a su peso y su torpeza?

2. ¿Por qué los hipopótamos son torpes?

No por casualidad me refiero a los hipopótamos. La masa y el volumen de estos animales se explican fácilmente por lo expuesto en el artículo anterior. En la naturaleza no pueden existir seres con tamaños enormes, que sean, al mismo tiempo, ágiles y graciosos. Comparemos el hipopótamo (de 4 metros de longitud) con la ardilla (de 15 centímetros de longitud). Las formas extrínsecas de sus cuerpos son aproximadamente semejantes; pero nosotros ya hemos explicado que los animales geométricamente semejantes no pueden poseer el mismo movimiento libre. Si los músculos del hipopótamo fuesen geométricamente semejantes a los músculos de la ardilla, el hipopótamo sería, en relación a la ardilla:

$$400 / 15 \approx 27 \text{ veces más débil}$$

Para poder compararse con la ardilla en agilidad, los músculos del hipopótamo deberían ser 27 veces más voluminosos de lo que son, en relación a la proporcionalidad, pero esto significaría al mismo tiempo que su diámetro debería ser $\sqrt{27}$ es decir, 5 veces mayor.

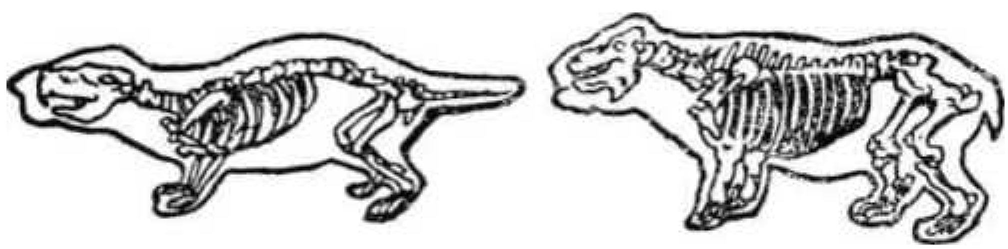


Figura 80. El esqueleto de un hipopótamo (a la derecha) comparado con el de una ardilla, reducidos al mismo tamaño. Se observa la desproporción de los huesos del hipopótamo.

Con relación a ellos los huesos deberán ser capaces de aguantar tales músculos. Ahora se comprende por qué el hipopótamo es tan torpe y gordo y posee un esqueleto tan macizo. La Fig. 80, en la cual se reflejan la misma medida y los mismos contornos exteriores de ambos animales, resalta claramente lo expuesto por nosotros. La siguiente tabla indica que en el mundo de los animales reinan leyes generales según las cuales cuanto mayor es el animal tanto mayor es el porcentaje de su peso que corresponde al esqueleto.

Mamíferos	Peso del Esqueleto
Musaraña	8%
Ratón	8,5%
Conejo	9%
Gato	11,5%
Perro (tamaño medio)	18%

Pájaros	Peso del Esqueleto
Abadejo	7%
Gallina	12%
Ganso	13,5%

3. La estructura de los animales terrestres

Muchas estructuras especiales de los animales terrestres están basadas en la aplicación natural de aquella simple ley mecánica de que la capacidad de trabajo de sus extremidades es proporcional a la tercera potencia de su longitud, pero para realizar cualquier trabajo es imprescindible agregar la cuarta potencia. Por esto, cuanto más grande es el animal tanto más cortas son sus extremidades: patas, alas y antenas. Solo se observan extremidades muy largas entre los animales terrestres más pequeños. De todos es conocido que se puede mencionar la araña como ejemplo de animales de patas largas. Las leyes de la mecánica no impiden la existencia de formas semejantes, porque su peso no es muy grande. Sin embargo si estos animales tuvieran un gran tamaño, por ejemplo, el tamaño de un zorro, serían mecánicamente imposibles: las piernas no soportarían el peso del tronco y perderían su movilidad. Solo pueden existir en el océano, formas de animales tan extrañas, en las que el peso de los animales se equilibra debido a la fuerza del agua que lo empuja; por ejemplo, el cangrejo de aguas profundas, a cuyo cuerpo de medio metro, corresponden unas piernas de tres metros de longitud.

Bajo la acción de estas leyes se efectuó también el desarrollo de los diversos animales. Las extremidades de las personas adultas son siempre más cortas que las de los fetos; el crecimiento del tronco supera al crecimiento de las extremidades, gracias a esto se establece la realización conveniente entre la musculatura y el trabajo, imprescindible para el desplazamiento.

El primero que se interesó por estos interesantes problemas fue Galileo. En su libro: *Conversaciones para dos nuevas ramas de la ciencia*,[3] en el cual fueron expuestos las bases de la Mecánica, dedica un importante lugar a tales problemas como los de los animales y plantas de tamaños desmesurados, "de los esqueletos de los animales gigantes y demás" y de los tamaños posibles de los animales que viven en el agua, etc.

Volveremos a tratar de estos problemas al final del capítulo.

4. El destino de los monstruos prehistóricos

Así las leyes de la Mecánica ponen algunos límites al tamaño de los animales. Aumentando la fuerza absoluta de los animales, el gran tamaño de éstos disminuye su movimiento porque condiciona una masa no proporcional de sus músculos y su esqueleto. Lo uno y lo otro pone al animal en condiciones desventajosas en relación a la obtención de los alimentos. Las exigencias de los alimentos crecen con el aumento de las medidas de los animales, y la posibilidad de lograrlos disminuye (debido a la disminución de la movilidad).

Habiendo existido algunos animales de enormes tamaños, al comenzar la formación de la fauna, sus necesidades de alimentación sobrepasaron la posibilidad de lograrla.

Este aspecto los condenó poco a poco a su extinción. Hemos visto que los animales gigantes de las primeras eras geológicas han desaparecido unos tras otros de la arena de la vida. De todas las diversas formas de enorme tamaño, creadas por la naturaleza, solo algunas han podido sobrevivir hasta nuestros días. Las más grandes, entre ellas los reptiles gigantes, no tenían capacidad para seguir viviendo. Las leyes mecánicas ahora mencionadas, habrán ocupado uno de los lugares más destacados, entre las numerosas causas que produjeron la extinción de los animales gigantes de la época primitiva de la tierra. No podemos tener en cuenta la ballena,

[3] *Discorsi e Dimostrazioni Matematiche, intorno a due nuove scienze attenenti alla meccanica & i movimenti locali* (Discurso y Demostración Matemática sobre dos nuevas ciencias referentes a la Mecánica y al Movimiento Local). Escrito por Galileo Galilei en el año 1.638. *(N. del E.)*

porque vive en el agua, en condiciones diferentes, y lo dicho acá no se aplica a ella (véase la viñeta este capítulo).

Figura 81. Un gigante del prehistórico, trasladado a una ciudad actual.

Es posible plantear el problema del siguiente modo: si no resultan útiles para la vida de los organismos los tamaños grandes, ¿por qué la evolución no procedió a disminuir el tamaño de los animales más grandes? Esto obedece a que las formas grandes no son más fuertes que las pequeñas sino que son relativamente más débiles. Si observamos otra vez el ejemplo de las Aventuras de Gulliver, veremos que un trabajo del gigante, que a Gulliver, le resulta 12 veces más difícil de ejecutar de acuerdo a su masa muscular, al gigante le resulta 1.728 veces más difícil; si disminuimos esta carga en 12 veces, de modo que la pueda soportar los músculos del gigante, la fuerza que debe hacer el gigante para levantar su mano es 144 veces mayor que la que debe hacer Gulliver al levantar la suya. Por esta razón, los animales gigantes llevaban una extraordinaria ventaja al luchar con los animales más pequeños. Pero en estos enfrentamientos entre enemigos de diferentes tamaños, los animales más grandes se exponen a condiciones insoportables para ellos (falta de abastecimiento de alimentos).

5. ¿Quién salta más?

Muchas personas se asombran de los saltos que dan las pulgas (hasta 40 centímetros), lo que sobrepasa en varios centenares de veces su propio tamaño; no pocas veces se oye decir que el hombre podría compararse con la pulga si fuera capaz de saltar a una altura de $1,7 \times 100$, es decir, á 170 metros.

El cálculo mecánico restablece la reputación del hombre. Para facilitar el cálculo consideremos el cuerpo de la pulga geométricamente igual al cuerpo del hombre. Si la pulga pesa p kilogramos y salta a la altura de h metros, entonces realiza con cada salto ph kilográmetros de trabajo. Sin embargo, el hombre realiza en cada salto PH kilográmetros de trabajo, siendo P es el peso de su cuerpo y H la altura del salto (ciertamente esto equivale al aumento de su fuerza de gravedad). Como el hombre es 300 veces mayor en tamaño que la pulga, el peso de su cuerpo es 300^3p, y por lo tanto, el trabajo del salto del hombre es igual a 300^3ph. Esto es:

$$300^3\ H / h$$

veces más trabajo que el de la pulga. La capacidad para realizar este trabajo por parte del hombre, es 300^3 veces mayor que la que posee la pulga. Por eso para él el gasto de energía es 300^3 veces mayor, porque

Trabajo del hombre / trabajo de la pulga = 300^3

de donde resulta la ecuación:

$$300^3\ H/h = 300^3$$

entonces $H = h$

Por esto el hombre se puede comparar con la pulga en el arte de saltar incluso en el caso en que levante el centro de gravedad de su cuerpo a la misma altura a la que salta la pulga, es decir a 40 centímetros.

Continuamente realizamos estos saltos, y por tanto, no tenemos que envidiar en nada a las pulgas en lo referente al arte de saltar.

Si este cálculo no parece bastante convincente, debe recordarse que saltando 40 centímetros, la pulga levanta sólo su propio peso, por cierto, insignificante. El hombre, por el contrario, arrastra una carga de 300^3, es decir, 27 millones de veces mayor. O sea que 27 millones de pulgas que saltan al mismo tiempo, levantan en su conjunto una carga igual al peso del cuerpo humano, y por lo tanto, la comparación arroja un resultado a favor del hombre, porque este puede saltar mucho más de 40 centímetros.

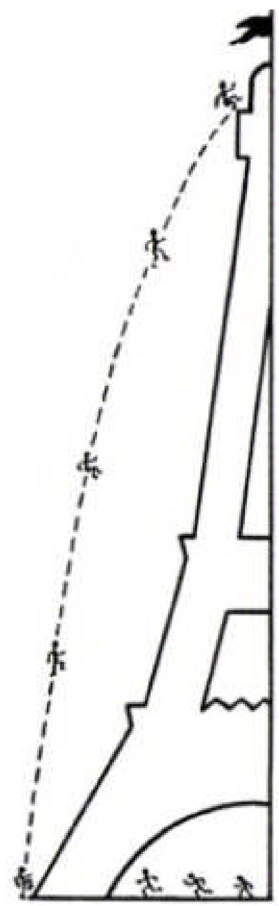


Figura 82. Si el hombre saltara como la pulga

Ahora se comprende por qué los animales con tamaños pequeños realizan saltos relativamente grandes. Si se comparan los saltos de los animales igualmente adaptados para los brincos (debido a la construcción de sus extremidades inferiores) con el tamaño de sus cuerpos, tenemos las siguientes cifras:

El grillo salta 30 veces la longitud exacta de su cuerpo.

El gerbo[4] salta 15 veces la longitud exacta de su cuerpo.

El canguro salta 5 veces la longitud exacta de su cuerpo.

6. ¿Quién vuela más?

Si deseamos comparar exactamente la capacidad de los diversos animales para volar, debemos recordar que la acción del golpe de las alas depende de las condiciones de la resistencia del aire; esta última depende del tamaño de la superficie de las alas, siendo la velocidad proporcional al movimiento de las mismas. Al aumentar el tamaño del animal, crece la superficie de las alas, en proporción a la segunda potencia del aumento de su longitud, mientras que el peso de las alas, crece proporcional a la tercera potencia de su aumento en longitud.

Figura 83. El avestruz junto a un esqueleto del pájaro epiornes de Madagascar, actualmente desaparecido. A la izquierda, una gallina

Por esta razón, la carga de 1 cm^2 de un ala, crece según el aumento del tamaño del ave. Las águilas del país de los gigantes (en las Aventuras de Gulliver) debían aguantar por 1 cm^2 de sus alas, una carga 2 veces mayor en comparación con un

[4] Gerbo. Mamífero roedor, pariente del hámster y la rata, pero se diferencia de éstas porque posee largas patas traseras con las que salta como un canguro, escapando a sus depredadores. Habita en Asia y África. (*N. del E.*)

águila corriente y eran, por lo tanto, peores voladoras que las águilas diminutas del país de los liliputienses que tenían que aguantar una carga 12 veces menor que las de las águilas normales.

Si pasamos de los animales imaginarios a los animales reales encontraremos los siguientes números referentes a las cargas (el peso del animal) que tienen que soportar por 1 cm^2 de sus alas:

Insectos	
Libélula (0,9 gramos)	0,04 gramos
Mariposa del gusano de seda (2 gramos)	0,10 gramos
Aves	
Golondrina ribereña (209 gramos)	0,14 gramos
Halcón (260 gramos)	0,38 gramos
Águila (5.000 gramos)	0,63 gramos

Vemos que cuanto mayor es el animal volador, tanto mayor es la carga que soporta 1cm^2 de sus alas. Es claro que debe existir un límite para el aumento del cuerpo del pájaro.

Cuando se rebasa este límite, el pájaro ya no puede mantenerse con sus alas en el aire; por esta razón, los pájaros más grandes han perdido su capacidad de volar. Tales gigantes del mundo emplumado como el casuario que tiene casi el tamaño de un hombre, el avestruz (2,5 m) o el *epiornis*, un pájaro todavía mayor (5 m), hoy extinguido, oriundo de Madagascar, no tienen capacidad para volar; volaron únicamente sus antepasados de menor tamaño, los que debido a la falta de uso de sus alas, perdieron su capacidad de volar y al mismo tiempo aumentaron su tamaño.

7. La caída inofensiva

Los insectos caen sin hacerse daño de alturas desde las que nosotros no nos decidiríamos a saltar. Para salvarse de sus perseguidores, algunos de estos animales se tiran con ímpetu desde árboles muy altos y caen en tierra sin hacerse ningún daño. ¿A qué se debe esto?

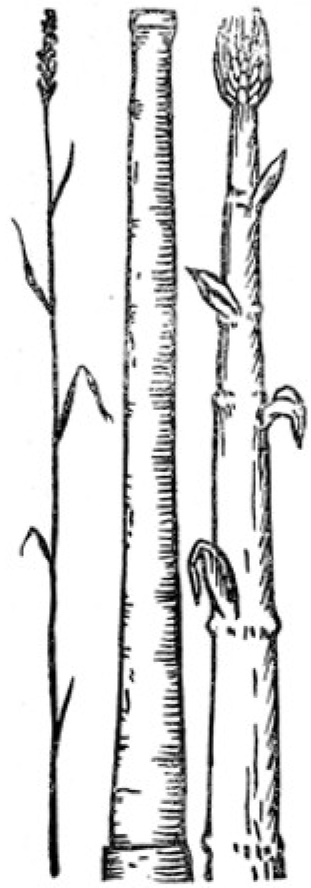


Figura 84. Una paja de trigo, una chimenea de una fábrica y una paja aumentada imaginariamente a 140 metros de altura

Cuando un cuerpo de pequeño tamaño choca con un obstáculo, casi en el acto interrumpe todos sus movimientos; así, al golpearse, ninguna parte del cuerpo presiona a la otra.

Otra cosa es la caída de un cuerpo grande: si al golpearse, la parte inferior interrumpe su movimiento, la parte superior continúa moviéndose y presiona con fuerza la parte inferior. Esta sacudida resulta mortal para el organismo de un ser vivo de gran tamaño. Si caen 1.728 liliputienses de un árbol, como gotas de lluvia, se hacen poco daño, pero si estos mismos liliputienses caen como una bola compacta, los de arriba aplastarán a los de abajo. Un hombre de tamaño normal es una bola compacta de 1.728 liliputienses.

Esta es la causa principal de la inocuidad de la caída de los animales pequeños. La segunda causa consiste en que sus partes son más flexibles. Cuando más delgadas son las barras o las piezas planas tanto más flexibles son ante la acción de las fuerzas exteriores. Los insectos de tamaño muy delgado, son 100 veces menos voluminosos que los mamíferos.

Por esto, como indica la fórmula de la teoría de la elasticidad, las partes que conforman su cuerpo, son mucho más elásticas al chocar. Sabemos que cuando el golpe se reparte en un espacio de longitud 100 veces mayor, su acción es igual número de veces más blanda.

8. ¿Por qué los árboles no crecen hasta el cielo?

"La naturaleza tiene cuidado de que los árboles no crezcan hasta el cielo", dice un proverbio alemán. Veamos cómo se realiza este "cuidado".

Imaginemos el tronco de un árbol que se sostiene sólidamente por su propio peso, cuya longitud se aumenta en 100 veces. Como consecuencia de esto, el peso del tronco aumenta 100^3, es decir, 1.000.000 de veces. Cede la resistencia de este tronco, debido a que su sección solo aumenta 100^2, es decir, en 10.000 veces. Cada cm^2 de la sección del tronco recibiría entonces 100 cargas completas. Resulta claro que en caso de que l árbol crezca -quedando geométricamente igual en toda su longitud-, su peso derribará su base.[5] Para que no se parta un árbol muy alto debe ser grueso en su base, en proporción con el resto. Pero al aumentar el grosor, aumenta también el peso del árbol, es decir, que aumenta la carga sobre su base.

Esto quiere decir que los árboles deben tener un límite de altura, después del cual no se puede lograr un aumento mayor, o el árbol se quiebra. Por esta razón, "los árboles no crecen hasta el cielo".

Nos asombra la estabilidad extraordinaria de la paja que alcanza, por ejemplo, en el centeno, una altura de 1½ metro, con un insignificante grosor de solo 3 mm. La obra más perfecta del arte de la construcción -una chimenea de una fábrica cerca de Freiberg (Alemania)-[6] tiene una altura de 140 metros con un diámetro medio de 5,5 m. Su altura en total abarca 26 veces su grosor, mientras que en el caso de la

[5] Con excepción de los casos en que el tronco adelgaza hacia arriba, tomando la forma de una "viga de resistencia proporcional".

[6] *Freiberg*. Ciudad en Sajonia, Alemania, capital del distrito de Freiberg. Población 45.428 (año 2.001).
La ciudad fue fundada en 1.186, y ha sido un centro de la industria de explotación minera durante siglos. La Universidad de Freiberg, fundada en 1.765, especializada en minería, es la universidad de minas y metalurgia más antigua del mundo. *(N. del E.)*

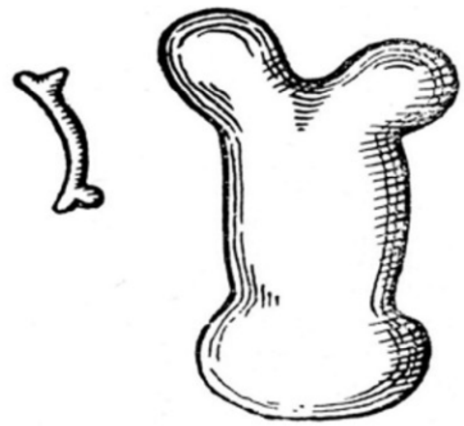
paja del centeno esta relación es igual á 500. Aquí, sin embargo, no se puede afirmar que esto se deba a que las obras de la naturaleza sean mucho más perfectas que las hechas por el hombre. El cálculo (ligeramente complicado) nos enseña que si en la naturaleza se pudieran crear tallos de 140 metros de altura, del mismo tipo de la paja del centeno, su circunferencia tendría unos 3 metros, para que el tallo tuviera la misma solidez de la paja de centeno. Como vemos hay poca diferencia con lo que ha creado el hombre.

Mediante algunos ejemplos se puede ilustrar el crecimiento desproporcionado de las formas de las plantas en relación al aumento de su altura. Mientras que la paja del centeno (1½ m.) sobrepasa su grosor en 500 veces, el palo de bambú (30 m) sobrepasa su grosor en 130 veces, el pino (40 m) sobrepasa su grosor en 42 veces y el eucalipto (120 m) sobrepasa su grosor en 28 veces.

9. De un libro de Galileo

Terminemos esta parte del libro con algunas citas de la obra del descubridor de la Mecánica, Galileo, en *Diálogos sobre dos nuevas ciencias*.

Salvatio. Vemos claramente la imposibilidad no sólo para el arte sino también para la naturaleza misma de aumentar ilimitadamente las medidas de sus creaciones. Es decir, que no es posible construir barcos, palacios y templos de tamaños enormes, cuyos mástiles, vigas, esqueletos de hierro, cuyas partes integrales fuesen bastante sólidas. Por otra parte, tampoco en la naturaleza pueden existir árboles infinitamente altos porque sus ramas sucumbirían bajo la fuerza de su propio peso. Del mismo modo resulta imposible imaginar un hueso de un hombre, de un caballo o de cualquier clase de animal de un tamaño tan enorme que correspondiese a un tamaño que sobrepasase al tamaño corriente de los seres vivos; los seres vivos, sin embargo, pueden sobrepasar su tamaño normal únicamente cuando la sustancia de sus huesos sea más sólida y fuerte que en los casos acostumbrados o si sus huesos se transformasen aumentando su circunferencia, lo que haría que la estructura y el aspecto exterior de los animales fuera mucho más grueso. Esto ha sido previsto por un conocido poeta (Ariosto, en la obra *Orlando furioso*),[7] donde dice, refiriéndose a los gigantes:



"Debido a su gran tamaño, sus extremidades eran tan gruesas, que su aspecto era verdaderamente horroroso."

"Como ejemplo, quiero demostrar a ustedes lo anteriormente dicho por la figura de un hueso alargado sólo tres veces pero aumentado en grosor a tales medidas que pueden servir a animales de gran tamaño correspondientes a los mismos tamaños de un pequeño hueso de un animal de estatura normal. Se puede ver qué desmesurado grosor impone tal aumento.

De ello resulta claro, el que si se quiere conservar las proporciones del cuerpo en el caso del gigante, hará falta encontrar para la elaboración de los huesos, materiales más útiles y sólidos o nos tendremos que conformar con que los cuerpos grandes posean una fuerza relativamente menor que los cuerpos de los hombres de tamaño normal; el aumento de las medidas hasta valores extraordinarios traerá como consecuencia que el cuerpo sea aplastado y sucumba bajo la gravedad de su propio peso. Por el contrario, vemos que en el caso de la disminución del tamaño de los cuerpos, no se disminuye en la misma proporción su solidez; en cuerpos más pequeños se efectúa incluso un aumento relativo de la solidez; así, pienso que un perro no muy grande puede llevar sobre sus espaldas dos o tres perros iguales que él, mientras que un caballo no puede llevar sobre sus espaldas ningún otro caballo de igual tamaño que él.

[7] Ludovico Ariosto (1.474 - 1.533). Poeta italiano, autor del poema épico *Orlando furioso* (1.516). *(N. del E.)*

Simplicismus. Tengo bastantes razones para dudar de la validez de lo dicho por usted, porque a una gran cantidad de cuerpos, que encontramos entre los peces, como por ejemplo la ballena[8] que por su tamaño, si no me equivoco es igual a decenas de elefantes y a pesar de esto no se desploma por el peso de su cuerpo.

Salvatio. Vuestra opinión, Sr. Simplicismus, plantea ante mí la tarea de recordar todavía una de las condiciones expuestas ya en el comienzo, en las cuales los gigantes y los animales de gran tamaño pueden vivir y moverse no peor que los pequeños. En estas condiciones, en lugar de aumentar el contorno y la solidez de los huesos y de otras partes, lo que a su vez aumenta su peso y el peso de las partes que forman el cuerpo, se puede efectuar una estructura y proporción de los huesos que disminuye de modo decisivo el peso de toda la materia, como por ejemplo, de los huesos y partes del cuerpo que están cercanos entre sí y sostenidos por ellos. Este segundo camino lo realiza la naturaleza en el caso del pescado cuyos huesos y otras partes del cuerpo no sólo están hechas de materias mucho más ligeras, sino que son de un peso insignificante.

Simplicismus. Un bonito aspecto para terminar su discurso, Sr. Salvatio, usted quiere decir que como el lugar donde viven los peces es el agua, la cual debido a la fuerza de su gravedad rebaja el peso de los cuerpos sumergidos en ella, la materia de la cual se compone el pescado pierde peso en el agua y por lo tanto no puede tener un sobrepeso.

Sin embargo, esto no es bastante para mí, porque a pesar de que se puede objetar el que los huesos del pescado no sobrecargan al cuerpo, la materia de estos huesos tiene peso.

¿Quién puede afirmar que la costilla de una ballena, tan grande como una viga, no tiene un peso tan notable, que pueda caer al fondo del mar? Pero según su teoría, no puede existir en la tierra un cuerpo del tamaño de la ballena.

Salvatio. Para poder responder mejor a sus dudas he planteado el problema, al comienzo, ante usted: ¿No ha visto usted a veces un pescado en aguas tranquilas, inmóvil, sin bajar hasta el fondo ni subir a la superficie, ni realizar ningún movimiento?

---

[8] En la época de Galileo la ballena era considerada como un pescado. En. realidad, la ballena es un mamífero, como bien se puede comprobar, de donde resulta que la ballena es un mamífero que vive en el agua.

Simplicismus. Este al que usted se refiere, es un fenómeno bien conocido.

Salvatio. Pues si los pescados pueden permanecer en el agua sin movimiento entonces esto es claro testimonio de que todo el conjunto general de sus cuerpos es igual al peso del agua, y como en sus cuerpos hay partes más pesadas que el agua, debe haber otras partes más ligeras que ésta, que producen este equilibrio. Como los huesos son más pesados, la carne o los otros órganos deben ser más ligeros que el agua y ellos deben equilibrar, por su bajo peso, el peso de los huesos. De tal modo, en el agua se efectúa completamente lo contrario de lo que hemos visto en los animales terrestres: mientras que en el caso de estos últimos los huesos soportan su peso y el de la carne, en el caso de los animales que viven en el agua, la carne no sólo soporta su peso sino también el peso de los huesos. De tal modo no es extraño que animales tan grandes puedan existir en el agua y no en la tierra, es decir, en el aire.

Sagredo. A mí me ha gustado mucho la exposición del señor Simplicismus. El problema ha sido planteado exactamente por él y también ha sido explicado. Yo deduzco de ello, el que si uno de tales animales viviese en la superficie de la tierra no podría sostenerse por mucho tiempo, porque los enlaces entre los huesos pronto se quebrantarían y el cuerpo se desplomaría”.

CAPÍTULO 11
UN PASEO ANIMADO AL PAÍS DE EINSTEIN
Resumen de O. Volberg

Contenido:

1. Observaciones Preliminares

Hay muchos libros magníficos en los cuales se expone la teoría de la relatividad de un modo más o menos accesible a todos. Pero hace falta decir la verdad; estos libros no son útiles para nadie.

Los vulgarizadores de la teoría de Einstein comprometen muchas veces grandemente al lector con argumentos lógicos y arrastran a éste humilde cautivo, hasta el país de Einstein.

Comprender estos argumentos no es difícil, pero encontrar lo que se deduce de ellos, es lo que no puede hacer un lector corriente. La lógica arrastra al pensamiento hacia un mundo nuevo, pero la imaginación débil se pierde sin fuerza en sus umbrales.

Nuestros conceptos e imágenes se han formado bajo la influencia de aquellos factores ordinarios entre los cuales vivimos. Einstein afirma que estos conceptos e imágenes corresponden a hechos aproximados. Responsable de estas inexactitudes es la calidad burda de nuestros órganos de percepción; nosotros no observamos las transformaciones que se efectúan en la realidad. Si estas transformaciones fuesen más perceptibles las revelaríamos y entonces nuestros conceptos sobre el mundo serían coincidentes con el mundo existente.

Imaginémonos un país donde todo sucede igual que en nuestro país, pero donde las particularidades sobre las cuales habla Einstein se destacasen con más exactitud.

Quedémonos algún tiempo en este país, vivamos allí entre nuevos hechos, aprendamos a observar las cosas desde el punto de vista especial de sus habitantes, es el mejor método para conocer aquellos conceptos y concepciones nuevos que forman la esencia de la teoría de la relatividad.

Este es el contenido de este capítulo: nosotros enseñamos la teoría de la relatividad mediante una excursión. Pero mientras que nos encontramos en el país de Einstein, difícilmente comparable con cualquier otro mundo, con algunas de las relaciones bastante simples, esta pequeña introducción nos capacita para participar en los "descubrimientos realizados sobre la tierra".

2. El mundo número 1

Las Extrañas Aventuras del Señor Harwood

Una carretera recta como una flecha, amplia y lisa, dio a mi automóvil la posibilidad de desarrollar una velocidad de 70 kilómetros por hora. Yo había calculado recorrer en dos horas el camino hasta la capital, donde debía verme con el profesor M. que se había citado conmigo exactamente a las tres de la tarde. Serían aproximadamente las 12 del mediodía y según mis cálculos me quedaba tiempo suficiente. Puse el equipaje en el automóvil. El Sr. Barney, propietario del hotel donde vivía, me acompañó amablemente y me decía:

- Hasta la vista, Sr. Harwood. Vuelva pronto. He tenido cuidado de proveerle de vituallas para el camino. Usted dispone de todo lo necesario en esta canasta.

La canasta era del tamaño que yo le había indicado. Un recorrido de dos horas, como es comprensible, significaba para este hombre de bien, un verdadero viaje.

- Dentro de dos horas estaré en la capital -le contesté yo-. Hasta las tres estoy libre y espero poder comer. Sus preocupaciones sobre las provisiones están de más.

- Sí, tiene usted razón -contestó él, pareciéndome que lo hacía con alguna suspicacia-, en la capital podrá comer la segunda vez. En la canasta he puesto solamente una comida ligera para el camino: pan, ternera asada, una botella de leche y fruta. Gasolina tiene bastante. Ambos depósitos están completamente llenos.

¡Qué hombre más extraño! cree que para un viaje de tres horas me hace falta una comida; me va estropear el apetito, también me parece que echó demasiada gasolina para mi automóvil. Pero no quería molestarle. Le di las gracias y me despedí de él emprendiendo mi camino.

Eran exactamente las doce del mediodía. Un soleado día tranquilo, algo seco pero no muy caliente. Un tiempo excelente para un viaje. El motor trabajó excelentemente. Pero me sucedió algo extraño, me pareció como si no anduviese a la velocidad que esperaba.

El medidor de velocidad indicó 75 kilómetros/hora, sentía la corriente de aire que atravesábamos, pero no había caminantes en la carretera, y los alrededores parecían moverse lentamente hacia atrás. El primer kilómetro se me hizo extremadamente largo. Paré para revisar el coche. La máquina trabajaba excelentemente y todo lo que se encontraba a mis alrededores pasó lentamente a mi lado. Hace falta decir que me encontraba en una carretera cuyos bordes estaban rodeados de huertos, casas, campos y señales indicadoras de distancia.

A la una de la tarde día había recorrido unos 30 kilómetros. No era de suponer que llegaría a tiempo la cita. Abatido por completo, quedé sentado en mi auto, esforzándome en vano, por comprender lo que pasaba. A las tres sentí hambre y recordé al dueño de la fonda, que por cierto, había previsto una situación que yo no comprendía.

A las cinco de la tarde comenzaba a temer que la gasolina no me alcanzase. Al fin logré divisar la ciudad. Serían aproximadamente las seis de la tarde cuando llegué al hotel, donde ya de antemano había encargado una cama y comida para mí. Nadie me preguntó por mi tardanza. Sin embargo el dueño de la fonda se disculpó que la comida no estaba lista.

- Lo esperábamos a las dos -dijo- pero usted ha venido un poco más temprano.

- ¿Temprano? Ahora son exactamente las seis menos diez.

Le enseñé mi reloj. El miró el reloj y dijo en tono serio.

- Un excelente reloj, marcha bien, ¿usted salió a las 12?

- Sí…

- Ahora son las 2 menos 5. Usted hizo 75 kilómetros por hora.

Después este insensato, (parece que todos los encargados de hotel se habían vuelto locos), miró un reloj de pared y comparó la esfera de mi reloj y dijo.

- Sí, marcha muy bien.

Hizo esta observación sobre mi reloj y su marcha sin ninguna ironía.

Modificando las manecillas de mi reloj, me lo devolvió.

Después de haber comido la segunda vez con un excelente apetito, fui al encuentro del profesor que expresó su satisfacción por mi puntualidad.

No comprendía absolutamente nada y regresé más tarde al hotel.

Una vez terminados mis asuntos en la capital, decidí a pesar de mi cansancio, volver inmediatamente.

- No le hemos preparado nada para el camino -me dijo el dueño del hotel- ¿podría ser tan amable de esperar unos minutos?

- Déjenme salir, por favor -no me hace falta ni gasolina para el automóvil ni provisiones para mí- respondí.

¡Ay! En el camino me arrepentí de tomar esta decisión a la ligera.

El viaje de vuelta se pareció al de la mañana como se parecen dos gotas de agua. Otra vez el camino parecía difuso. El tiempo corrió muy lento. Encontré un campesino con un coche. A mí me llamó la atención que el caballo era extraordinariamente largo, y que el cochero me pareció bastante flacucho en un comienzo, pero cuando me alejé de él, le observé sobre su pescante y pude ver que parecía más bien la caricatura de un gordo, con un pecho y una espalda ancha y unos hombros enormemente estrechos. El caballo tenía una forma elíptica, es decir aplanada por encima y por debajo, distinguiéndose por su extraordinaria flexibilidad, de tal modo que parecía alargarse cada vez más (véase la viñeta al principio de este capítulo). Los pocos transeúntes casuales eran también tan desproporcionados como este campesino y parecían reflejos de espejos curvos o juguetes estropeados.

A las 7 de la noche me encontraba todavía en el camino. El cansancio y el hambre se habían apoderado de mí. Con ansia miraba al cesto, en el cual, por la mañana, había estado la comida, para ver si en él se encontraban algunas migas de pan olvidadas. Nada había quedado excepto una botella de leche agria.

En mi reloj eran ya las siete cuando llegué a mi hotel. Sin embargo aún no oscurecía. El reloj del hotel dio las 6, y así, por segunda vez, tuve que retroceder las manecillas del reloj. Mientras se preparaba la comida (la tercera de este día), el Sr. Barney llegó con leche fresca y caliente y un gran trozo de pan.

- ¿Es esta la leche de la noche? -pregunté yo, probando con ansia el pan y partiéndole en grandes trozos.

- Las vacas no han vuelto de los prados. La leche es de esta mañana.

- Pero mi leche, sabe usted, se puso agria -dije-, no he podido beberla en el camino de regreso a este lugar. Es extraño porque hoy el tiempo no es muy caluroso.

- ¿Qué hay de extraño? En este momento son las 8 de la noche.

- ¿Quizás me dio usted leche de ayer?

- No, tanto una leche como otra son de la misma hora.

- ¿Y cuánto tiempo tienen?

-19 horas.

- Pues si son de la misma hora, ¿por qué la mía está más vieja?

- Envejeció en el camino.

Este nuevo y monumental enigma me preocupó todo el día. Pero me sentía demasiado cansado para poder desenredar el significado de estos fenómenos extraños y decidí aplazar esta conversación.

Mister Harwood Aclara el Enigma

Al día siguiente, durante mucho tiempo me rompí la cabeza sobre lo que me había sucedido en el camino.

El cansancio y el apetito extraordinario podían ser causados por el camino y el cambio de clima. Pero ¿el enorme gasto de gasolina? ¡Dos depósitos en dos horas! O se rompió el tanque o el motor no está averiado. Se aclaran las alucinaciones. Pero y el reloj… ¿Cómo explicar su marcha asombrosa? ¿Una avería del mecanismo? Yo observé mi reloj y lo comparé con el reloj de pared. Hoy marcha bien. ¡Una avería que se arregla por sí sola! Pero ¿cómo comprender las conversaciones con los encargados de los hoteles? ¿Debo considerarlos como insensatos? Mister Barney debió bromear en lo referente a la leche. Dejé surgir ante mí la imagen de este gordinflón apacible y bonachón. En él hay mucho de grotesco, pero ni una gota de humor...

Yo quería una vez más ver a este hombre extraño para poder hablar claramente con él.

- Buenos días, Mister Barney -dije yendo hacia el comedor.

Movió la cabeza. Puso sobre la nariz sus grandes gafas con aretes de concha y me saludó con su mano gorda de dedos cortos.

- ¿Cómo se siente usted, después del viaje de ayer?

- ¡Pero después de qué viaje! ¡Un paseo de 2 horas…!

- Un paseo de 2 horas para nosotros, pero para usted un viaje de 6 horas. Dos "paseos" de 6 horas cada uno, esto no lo aguanta cualquier persona.

- ¿Por qué cuenta para usted 2 horas y para mí 6?

- ¿Y por qué no? Pues usted fue el que viajó.

Como veo, tiene usted dos cuentas, una para los que se quedan en casa y otra para los que viajan. Esto parece como en la guerra. Los meses en las trincheras valen por años en tiempos tranquilos y pacíficos.

-No –contestó-, no siga. Las cuentas dobles son para mí demasiado complicadas.

Para mí es bastante sencillo anotar los gastos, e hizo la cuenta y la escribió sobre la mesa. En lo que se refiere a las trincheras, allí no marcha el reloj con mayor rapidez que en cualquier otra parte del mundo.

¡Ciertamente este hombre no bromea!

-Hablando sobre relojes -dije- ayer sucedió algo extraño con mi reloj. Se adelantó 8 horas. Dos veces tuve que atrasarlo. No comprendo de qué se trata.

- ¿Cómo sucedió?

- Pues así, salí de aquí a las 12 del mediodía, finalicé mi viaje a las 2, pero al mirar mi reloj, eran las 6. En el camino de vuelta sucedió exactamente la misma historia.

- ¿Qué tiene de extraño?

- Lo extraño es que hoy mi reloj otra vez marcha bien. Se arregló completamente solo.

- Pero, ¿por qué piensa usted que su reloj se descompone?

Dijo sin inmutarse.

Permítame. Si en 2 horas, un reloj se adelanta 4 horas, entonces hay razones para considerar que se ha estropeado -dije.

Mister Barney levantó sus gafas de concha, de la nariz, las limpió y se las puso otra vez. Esto me indicó que el gordinflón se había emocionado. Después tomó una hoja limpia de papel y pintó sobre ella lo que me quiso explicar.

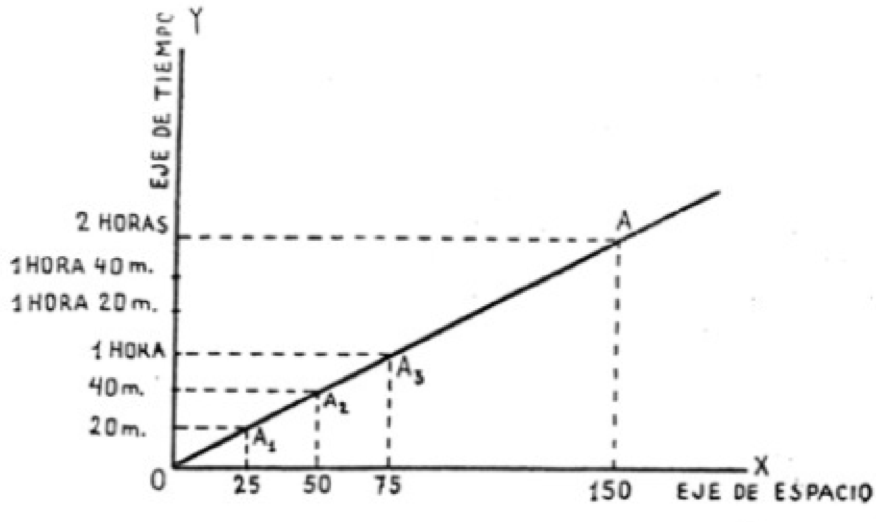


Figura 85

- Pues aquí está la gráfica de su viaje.

Me extrañé. ¡Este gordinflón sabía dar explicaciones mediante gráficas!

- ¿Pues por qué no? -dije yo echando un vistazo a sus figuras- explíqueme pues mi viaje de un modo gráfico, ya que eso le interesa.

Él puso un papel sobre la mesa, que yo delineé según las indicaciones de Mister Barney.

Consideremos estas dos líneas rectas (*OX* y *OY* en la Fig. 85), como los ejes de las coordenadas. Sobre el eje *OX* apreciamos la distancia, sobre el eje *OY* el tiempo. El punto *O* representa los acontecimientos que sucedieron aquí ayer en el hotel durante las 14 horas del día. El punto A_1, los acontecimientos que sucedieron en el camino hacia la ciudad, a una distancia de 25 kilómetros del punto de partida, a las 12 horas y 20 minutos.

¿Comprendido?

En vez de contestarle, expuse:

- El punto *O* representa mi salida de aquí. 20 minutos después me encontraba a 25 kilómetros de distancia, (punto A_1). Después de 40 minutos estuve a 50 kilómetros de distancia (punto A_2), después de una hora a 75 kilómetros de distancia de (punto A_3), y así sucesivamente. Todos los puntos que me representan en los diversos momentos se encuentran en la línea recta *OA*, El punto *A* representa mi llegada a la capital. La línea *OA* es la gráfica de mi viaje.

Mister Barney miró hacia mí diciendo:

- ¿*OX* es en este caso el eje de la distancia para los hoteles?

- Sí, a lo largo de esta recta calculo la distancia.

- ¿*OY* es el eje del tiempo para los hoteles?

- Sí, a lo largo de ella calculo el tiempo.

- ¿*OA* es el eje del tiempo para el viaje?

- Así lo creo. Quizás la recta *OA* y los puntos que describe el viajero en cada momento, se puedan llamar realmente el eje de tiempo para el viajero; más aún, cuando la recta *OY*, los puntos que describen los hoteles en cada momento, se llama el eje de tiempo de los hoteles. La observación de Mister Barney no carece de sentido, tanto más porque el viajero tiene derecho a observar las cosas como si estuviese inmóvil y los hoteles y caminos se desplazaran hacia atrás. Desde este punto de vista, la recta *OY* es la gráfica del movimiento de los hoteles y la recta *OA* el eje de tiempo del viaje.

- Sí, -dije- la recta *OA* se puede considerar como el eje de tiempo del viajero.

- ¿Y cuál es el eje de la distancia?

- Es el eje del espacio entre los hoteles. Pero yo pregunto ¿dónde está el eje del espacio para el viajero?

- El eje del espacio es igual para ambos -contesté.

Las gafas de Mister Barney se cayeron de la nariz. Las subió y se cayeron de nuevo. Contando por el número de movimientos, la emoción del gordinflón debía ser bastante grande.

-Tonterías -dijo- ¿el eje de tiempo es diferente, y sin embargo, el eje del espacio es el mismo? ¡Absurdo! El eje del espacio debe ser siempre perpendicular al eje del tiempo.

Así comenzó nuestra disputa. Nadie podía prever sus fatales consecuencias. Al comienzo solo me asombré por las extrañas faltas de Barney, las que yo creía, se debían a la incongruencia con la que él se refirió a mi reloj, a la gráfica y a la falta de sentido con la que habló en lo concerniente a mi viaje. Ahora ya sé que su opinión se debe a su inconsecuencia. La falta de sentido de Barney radicaba en su falta de lógica. Su opinión necia sobre la gráfica era el centro de su falta de sentido, la cual defendió a rajatabla de una manera necia. Pero yo ya no sospechaba cuan firme era la ciudadela que cubría las locuras de Barney y con alegremente me lancé a la disputa.

El autor se presenta en el escenario

Interrumpimos aquí la disputa entre Harwood y Barney, para dar a nuestros lectores los conocimientos necesarios sobre la personalidad de nuestros héroes y el lugar de la acción.

Harwood es el hombre más común de los que viven en nuestro mundo. El carácter, el tamaño, su ocupación y su dirección exacta no tienen ninguna importancia. Por cualquier medio desconocido, Harwood llegó a un mundo extraordinario (el mundo número 1), construido según leyes diferentes a las de nuestro mundo. Todas las aventuras, que suceden aquí a Harwood, se deben a las particularidades del mundo número 1.

Barney -el encargado del hotel- es un habitante oriundo del mundo número 1 en el cual cayó casualmente Harwood.

Para describir el mundo número 1, nosotros debemos recurrir a varias gráficas.

Este no es un método ordinario para hacer descripciones. Pero tampoco es ordinaria la naturaleza de lo descrito y para nosotros no es posible tratar este tema con los métodos simples, que se utilizan para describir las sendas de los bosques, el perfume de las flores, el rumor del mar y otros aspectos mesurables de la naturaleza. Solo es posible describir el mundo en su totalidad, en el idioma conciso y exacto de las matemáticas, y por lo tanto, el lector debe reconciliarse con nuestro método geométrico.

Las gráficas de Harwood son las gráficas corrientes que se enseñan en las escuelas. A los conocimientos que ustedes tienen sobre las gráficas conviene agregar lo siguiente:

No es obligatorio que los ejes de las coordenadas sean perpendiculares entre sí: no se varía nada, en esencia, si se escogen ejes de coordenadas inclinados con ángulos abiertos.

Así en la Fig. 86 se exponen algunos sucesos, verificados en la ruta entre Leningrado y Moscú. *OX* es el eje del espacio, inclinado hacia la recta *OY* que es el eje del tiempo. El punto *N* indica los acontecimientos, que sucedieron en el camino Leningrado-Moscú, a las 5 de la mañana, a una distancia de 600 kilómetros, de Leningrado. Los acontecimientos que se realizaron en este mismo instante de tiempo (5 de la mañana), a 300 kilómetros de Leningrado se indican en el punto P_1.

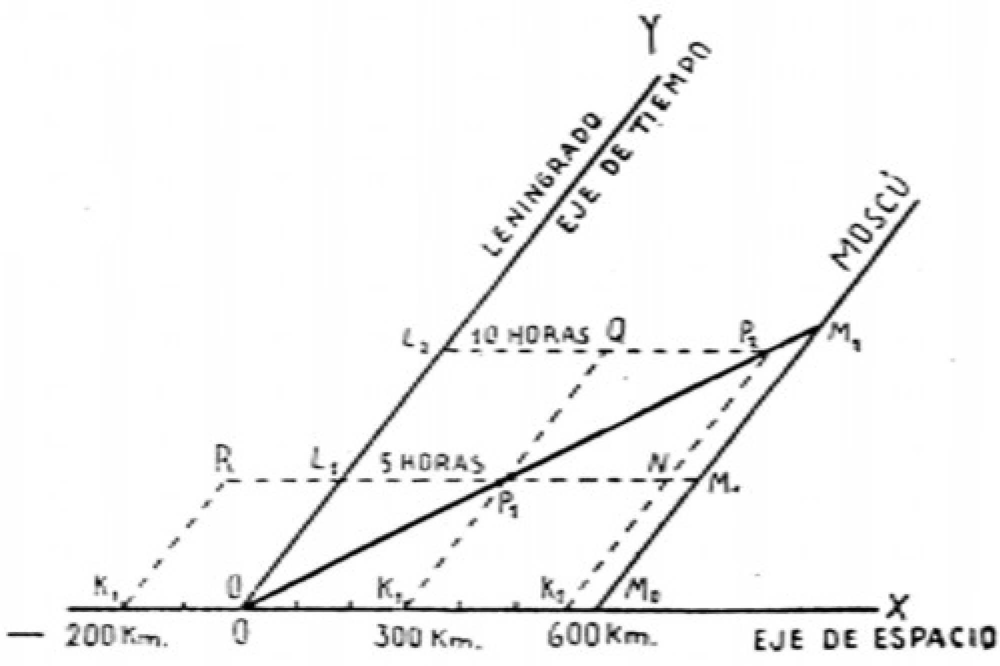


Figura 86

En general, para poder encontrar el tiempo y el lugar de los acontecimientos fijados en algunos puntos, hay que trazar por estos puntos, los ejes rectos y paralelamente las coordenadas; el segmento que una de estas rectas corta al eje del tiempo (*OY*), es para este eje la medida del intervalo de tiempo entre el acontecimiento pasado y el acontecimiento *O*, mientras que el segmento encima del eje del espacio (*OX*), indica el espacio entre los acontecimientos pasados y el acontecimiento *O*. El lector puede calcular sin dificultad, cuándo y dónde acontecerán los acontecimientos P_2, *Q*, K_1, L_1 indicados en la figura. El acontecimiento *R*, por ejemplo, sucedió a las cinco de la mañana a 200 kilómetros (menos 200 kilómetros) de Leningrado. El signo "menos" indica la orientación, contraria a la dirección hacia Moscú (Fig. 87).

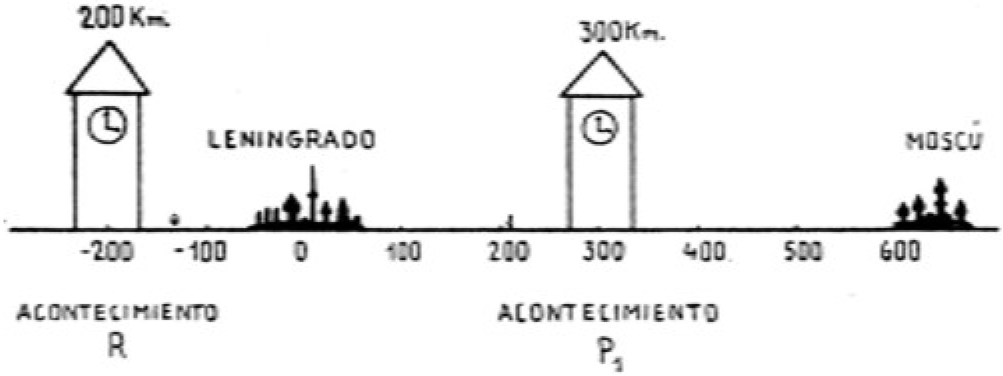


Figura 87

Los acontecimientos L_1, P_1, N suceden al mismo tiempo, exactamente a las 5 de la mañana. En general, los acontecimientos que corresponden a los puntos de una línea recta, paralela al eje *OY*, suceden al mismo tiempo. Los puntos del eje *OX* (eje del tiempo) describen los acontecimientos que suceden en Leningrado, en otras palabras, describen lo que pasa en Leningrado en los diversos instantes de tiempo.

En nuestra figura se aprecia fácilmente la distancia entre los acontecimientos o intervalos de tiempo, si se separa completamente un acontecimiento de otro. Por ejemplo, el acontecimiento N sucedió a 300 kilómetros del acontecimiento P_1 (esta distancia se mide con los segmentos K_1 K_2, que son iguales a los segmentos P_1 N). Por esto, los segmentos K_1 K_2, pueden medir tanto la distancia entre los acontecimientos P_1 y P_2 como también entre los acontecimientos Q y N.

Imaginémonos que justamente a la media noche sale un tren de Leningrado a Moscú que marcha a 60 kilómetros por hora. La partida desde Leningrado coincide con el acontecimiento O. A las 5 de la mañana, el tren pasa delante del guardavía que se encuentra a 300 kilómetros de Leningrado; este acontecimiento coincide con el acontecimiento P_1. A las 10 de la mañana, el tren se encuentra a una distancia de 600 kilómetros de Leningrado. El acontecimiento que sucede en este momento al tren, coincide con los acontecimientos P_2, M_2, cerca de la estación de Moscú. Proponemos al lector que él indique los puntos en los que se encuentra el tren a la 1, a las 2, a las 3 de la mañana, etc. Fácilmente se ve que todos los puntos que indican estos acontecimientos, es decir, los que señala la marcha del tren en un momento determinado, se encuentran en línea recta. Es decir, en la recta OM_2. Esta línea recta representa la gráfica del movimiento del tren (Fig. 88).

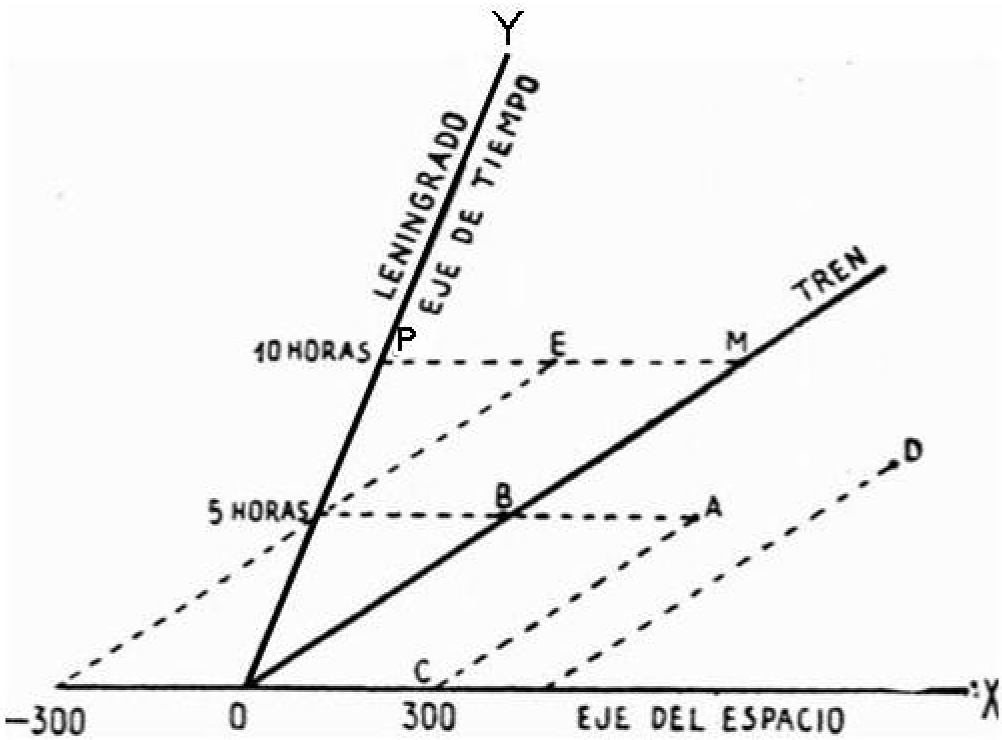


Figura 88

Así, la gráfica del movimiento del tren es la conjunción de los puntos que representan el tren en cada momento.

Admitimos que la Fig. 88 la hizo alguien que se encuentra ubicado fuera del tren; pero a los viajeros les interesa la distancia de cualquier acontecimiento, no visto desde Leningrado, sino visto desde el tren en el que se encuentran. ¿Cómo podemos utilizar nuestras gráficas para resolver este problema? Es muy fácil. Para saber a qué distancia del tren se realiza por ejemplo, el acontecimiento *A*, basta trazar por el punto *A* una recta paralela a *OM*. El segmento *OC*, que corta esta recta sobre el eje del espacio, indica la distancia exacta entre el acontecimiento *A* y el tren.

Asimismo en el momento en que sucede el acontecimiento *A*, el tren describe el punto *B*, es decir, que se encuentra a una distancia *BA*, del acontecimiento *A*.

Pero *BA* = *OC*. Por consiguiente, el acontecimiento *A* sucedió a 300 kilómetros del tren (desde el lado de Moscú) de tal modo que el acontecimiento *D* se realizó a 500 kilómetros del tren, desde el lado de Moscú y el acontecimiento *E* a "*menos*" 300 kilómetros del tren (300 kilómetros, desde el lado de Leningrado), etc. En una palabra, para apreciar la distancia de los diversos acontecimientos desde el tren hace falta proceder como si la trayectoria del movimiento del tren fuese el eje del tiempo. Así que, si queremos apreciar la distancia de los diversos acontecimientos desde Leningrado, debemos indicar en el eje del tiempo, sobre la recta *OY*, aquellos puntos que se describen desde Leningrado en los diversos instantes de tiempo. Si queremos apreciar la distancia de los acontecimientos desde el tren, debemos considerar como eje del tiempo la recta *OM*, formada por la trayectoria del tren.

El pasajero que está sentado en el tren, se mueve en relación al tren. Por eso considera que el eje del tiempo es la recta *OM*. De igual manera, la persona que se queda en Leningrado, elige como eje de tiempo, la recta *OY*.

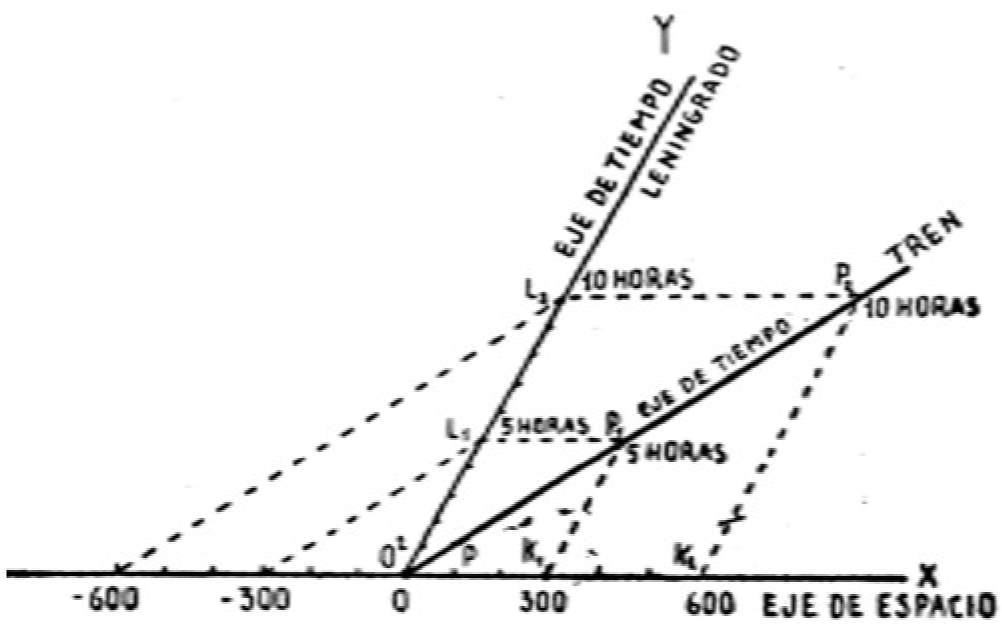


Figura 89

Debido a esto el observador que se queda en Leningrado considera, por ejemplo, que los acontecimientos L_1 y L_2 (que dimanan de Leningrado), se realizan en el mismo lugar, pero que los acontecimientos P_1 y P_2 (que dimanan del tren) se realizan en diversos lugares (Fig. 89).

En otras palabras, el habitante de Leningrado considera que Leningrado está en reposo pero que el tren se mueve; recíprocamente, el viajero cree que el tren está en reposo (P_1 y P_2 se efectúan en el mismo lugar) y que Leningrado se mueve hacia atrás (L_1 y L_2 se realizan en diferentes lugares). Sabemos que ambos conceptos (lo que cree el viajero y lo que piensa el hombre de Leningrado) son correctos.

El eje del espacio, para ambos observadores, es la recta *OX*, de tal modo tanto el viajero como el observador que se queda en Leningrado, están de acuerdo que, por ejemplo, los acontecimientos K_1 y K_2 se efectúan al mismo tiempo, es decir, a media noche. Para que el viajero, que considera el tren en reposo, y el observador que considera que Leningrado está en reposo, estén totalmente de acuerdo en su apreciación del tiempo (¡pues en nuestro mundo los cálculos son correctos si dan iguales!), es imprescindible elegir de un modo adecuado la medida del eje del tiempo. Por esto, hay que tener en cuenta que el segmento *OP* sobre el eje, representa para el viajero el mismo gasto de tiempo que representa el segmento de menor tamaño, O_1, en el eje de Leningrado.

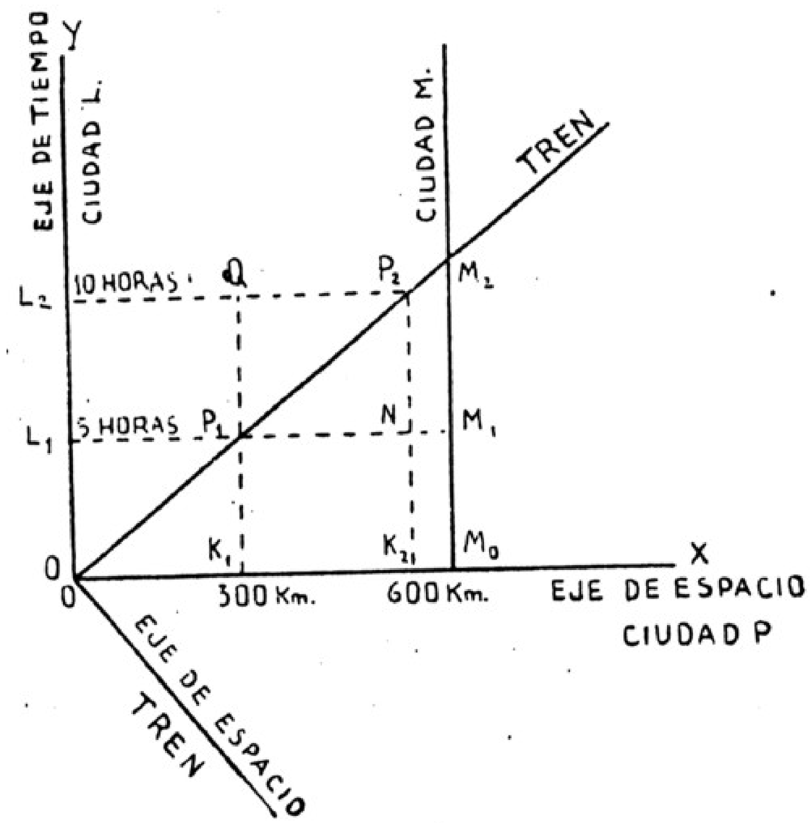


Figura 90

En una palabra, nuestro mundo, según los conceptos establecidos, está construido de tal modo, que las descripciones gráficas de los acontecimientos de dos observadores que se encuentran mutuamente en dos puntos que se mueven uno en relación al otro, (nosotros hablamos de igualdad de movimientos rectilíneos) deben comportarse según el principio: a diversos observadores corresponden diversos ejes de tiempo y diversas medidas de tiempo, pero el eje del espacio es el mismo.

Se ha construido de otra manera el mundo imaginario número 1. Para indicar en él los acontecimientos desde el punto de vista de dos observadores, que se mueven iguales, en línea recta, uno en relación con el otro, es necesario proceder según sus principios:

En primer lugar, los ejes de las coordenadas, deben ser, como indica Barney, mutuamente perpendiculares. Tratándose de la gráfica del movimiento del tren, desde el punto de vista de un observador que se queda en la estación, esta inclinación no tiene nada de nuevo: se logra la acostumbrada gráfica que se enseña en las escuelas (Fig. 90). Los puntos de la línea recta OM_2, indican la posición el tren en los diversos instantes. Los puntos de la línea recta OY (eje del tiempo) indican la orientación de las funciones, los puntos de la línea MoM_2 indican la orientación de la dirección. El punto P_1 indica el acontecimiento que sucedió a 300 kilómetros de la ciudad L, a las 5 de la mañana, M_2 es la llegada del tren a la ciudad M.

Si aceptamos ahora la posición del pasajero que viaja en el tren, éste considera de al tren como en reposo y el terraplén de los caminos alejándose del tren. A esta situación le corresponde la línea recta OM_2 como eje de tiempo. En esto no hay nada nuevo. Pero el eje del espacio del viajero debe ser perpendicular a su eje del tiempo. En esto consiste la primera diferencia decisiva entre el mundo número 1 y nuestro mundo. Además la escala de ambos ejes de tiempo del mundo número 1, debe ser igual, y del mismo modo deben ser iguales también las escalas de ambos ejes de espacio.

Para aplicar estas escalas a ambos ejes hace falta trazar un círculo alrededor de los orígenes de coordenadas, que forman el centro de la circunferencia. Esta circunferencia corta sobre los ejes coordenadas en segmentos iguales, que indican en todos los ejes de tiempo el mismo intervalo, y en todos los ejes de espacio la misma distancia (véase Fig. 91).

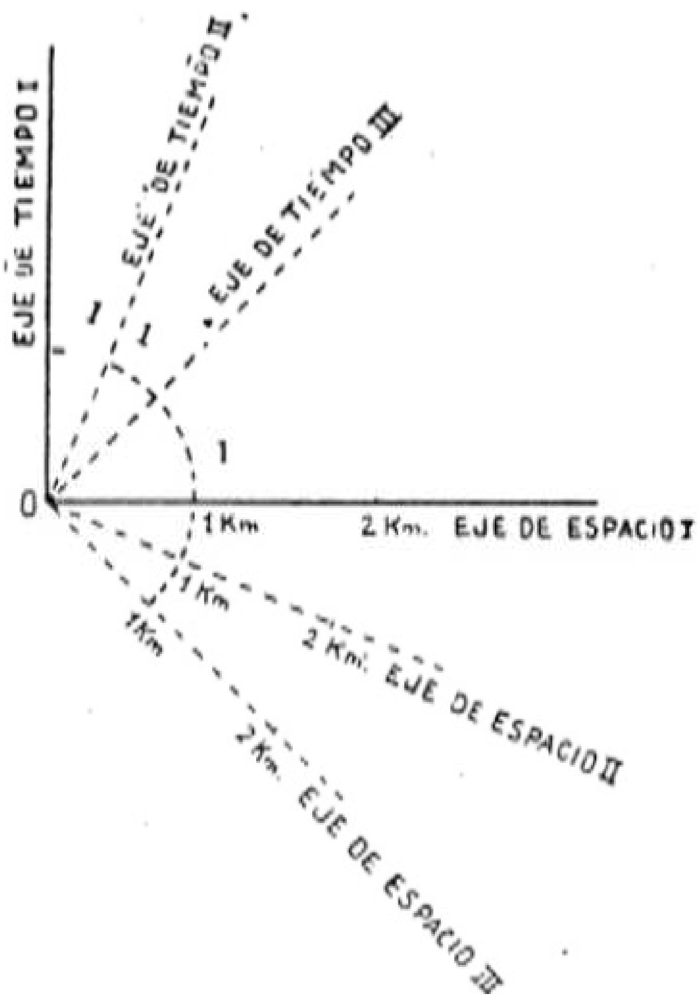


Figura 91

¿Por qué es necesario aplicar en el mundo número 1, el principio de sustitución de coordenadas al pasar de lo que ve un observador a lo que ve otro observador?

Porque el mundo número 1 está construido de tal modo que únicamente en caso de tener en cuenta estos principios, logramos un acuerdo sobre los acontecimientos relatados, que indican cómo se presentan en este mundo, los acontecimientos ante dos observadores que se mueven uno en relación al otro. En el momento de la partida del tren, tanto el viajero como el observador que se encuentra en la estación, ponen su reloj a las 12 horas.

Habiendo pasado algún tiempo, el observador ubicado en la estación ve a lo lejos una explosión y llamas, y oye una detonación. Mira su reloj y observa que la detonación (acontecimiento *A* en la Fig. 92), se efectuó a las 4 de la tarde. Esta misma explosión la oyó también el viajero, mira a su reloj y confirma que la explosión fue oída por él a las 6 de la tarde. También es cierto que ellos aprecian su distancia del lugar donde ocurrió la explosión, de un modo diferente. ¿A qué se debe esta diferencia? A la estructura del mundo número 1.

Este mundo está construido de un modo tal que resultan inevitables estas diferencias. La correcta representación gráfica de los acontecimientos que hemos indicado, está acorde con las particularidades que existen en este mundo.

La extraña diferencia en las apreciaciones del lugar y del tiempo de uno u otro acontecimiento para los diversos observadores, le parece a Harwood completamente absurda pero a nosotros nos parece que esta diferencia existe en el mundo real, como afirmó Einstein. Lo más interesante, por tanto, es percibir lo que Mister Barney ha llamado diferencia absurda del habitante del número 1.

Aunque el mundo número 1 se ha construido de forma diferente a nuestro mundo, no obstante hay entre ellos, según Einstein, muchas cosas comunes y que, comprendiendo el pensamiento de los habitantes del mundo número 1, podemos orientarnos sin dificultad alguna, en el complicado mundo de Einstein.

Volvamos ahora a nuestras narraciones anteriores.

Lecciones de matemáticas

Mister Barney había despertado tanto mi interés, que me sentía atraído por los extraños acontecimientos de ayer.

"¡Quién podía imaginar -pensé- que este hombre tan tranquilo, enloqueció con sus gráficas!"

Quizá si se le demuestra lo absurdo de su idea, sanaría por completo. ¿Pero cómo persuadirle de esta equivocación?

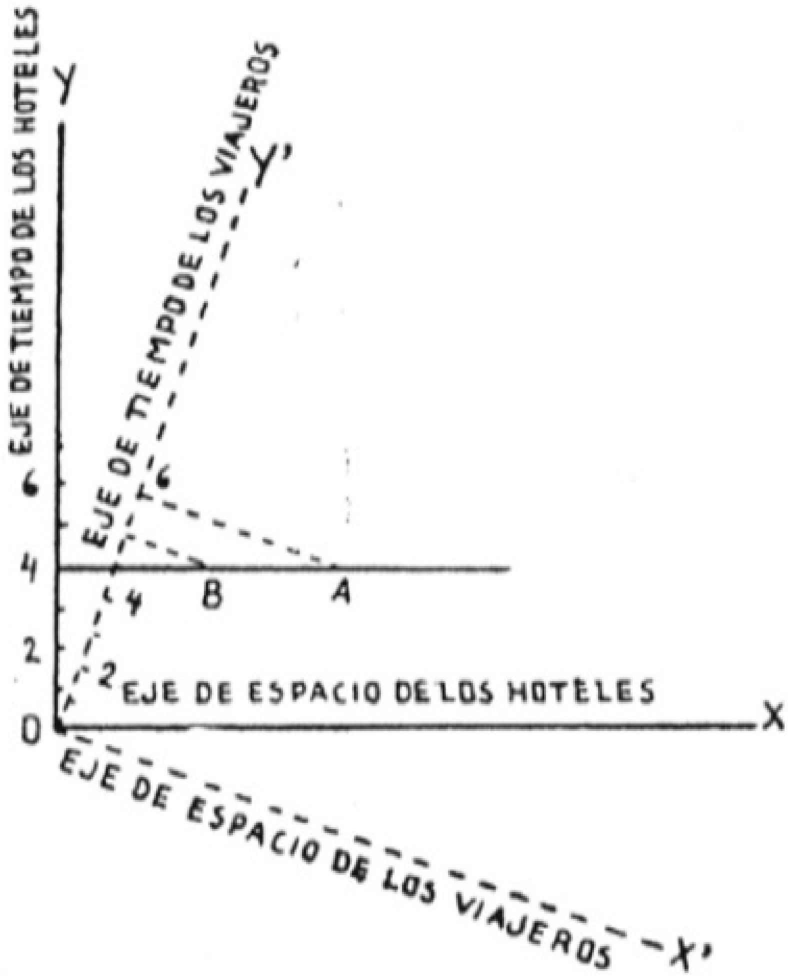


Figura 92

Me quedé reflexionando sobre los resultados que surgían de sus gráficas y pronto encontré una serie de lamentables absurdos.

Primer absurdo. El acontecimiento *A*, desde el punto de vista del observador que está sentado en el hotel, sucedió a las 4 de la tarde, y desde el punto de vista del viajero, a las 6 de la tarde (Fig. 92); el mismo acontecimiento se efectuó desde el punto de vista de diferentes observadores, a diferente hora.

Segundo absurdo. Dos acontecimientos *A* y *B* suceden al mismo tiempo para el observador, que se queda en el hotel, (ambos suceden a las 4 de la tarde) y no suceden al mismo tiempo para el viajero, para el cual el acontecimiento *A* se efectuó a las 6 de la tarde y el acontecimiento *B* a las 5 de la tarde.

Figura 93

Tercer absurdo. El observador y el viajero aprecian de un modo diferente el mismo intervalo de tiempo. Por ejemplo, entre los acontecimientos *O* y *A* pasaron, desde el punto de vista del observador, 4 horas, mientras que desde el punto de vista del viajero, pasaron 6 horas.

Cuarto absurdo. El observador y el viajero aprecian de un modo diferente el espacio. Por ejemplo, los puntos de la línea recta *EE′* (Fig. 93) representan las ciudades en diversos momentos. Mientras que la distancia desde los hoteles a las ciudades, desde el punto de vista de nuestro observador, es igual al segmento *OD*, es decir, igual á 150 kilómetros, distancia que, según el punto de vista del viajero, igual al segmento *OD′*, es decir igual a 200 kilómetros.

- ¿Cuántos kilómetros hay hasta la ciudad? -le pregunté, acercándome a él con cara de inocente.

- Ciento cincuenta.

- Pues mire usted, desde el punto de vista del viajero, si él acepta su método, el camino será mayor, por ejemplo, 200 kms.

Y con un aire triunfal extendí ante él su figura.

- Sí -fue la pronta respuesta de Mister Barney, incluso sin echar una sola ojeada al plano- desde el punto de vista del viajero se trata de 200 kilómetros.

- ¿Pero qué es esto?, usted mismo ha dicho que hasta la ciudad hay 150 kilómetros, ¿por qué engaña al viajero?, ¿qué clase de método es ese?

- ¿De qué engaño habla usted? Según mi punto de vista, desde mi hotel hasta la ciudad hay 150 kilómetros, pero desde el punto de vista del q viajero, son 200 kilómetros.

- ¿A qué atribuye usted la diferencia entre nosotros y el viajero?

- No hay ninguna diferencia.

- Recuerde, ¡uno dice 150 kilómetros y el otro 200! Y usted pregunta ¿qué diferencia…?

- ¡Sí!, ¿pero no es así? El uno dice: desde mi punto de vista son 150 kilómetros y el "otro" desde mi punto de vista son 200 kilómetros. ¿Qué diferencia existe en este caso?

- La distancia es la misma.

- No, es diferente.

- ¿Diferente…? ¿El camino es el mismo?

- El camino es el mismo, pero los puntos de vista son diferentes; por esto también la distancia es diferente. La longitud del camino es, desde el punto de vista de un observador, 150 kilómetros y desde el punto de vista del otro, 200 kilómetros.

- ¿La misma longitud puede ser diferente desde dos puntos de vista?

-No sólo la misma longitud sino también el mismo trayecto, pueden tener, desde diferentes puntos de vista, diferente longitud.

- No comprendo nada -dije, bromeando.

Mister Barney suspiró…

- ¿Desde qué ángulo ve usted esta campana? -preguntó.

- 10 grados.

- Aquel transeúnte la ve desde un ángulo de más de 20 grados -indicó Mister Barney, clavando en mí su mirada- ¿no le parece que entre sus dos conceptos hay una diferencia?

- ¡Cómo no! ¿Y qué diferencia? Miramos hacia la campana desde diferentes puntos de vista.

- Con diferentes puntos de vista la misma campana es visible desde diversos ángulos -indicó Barney-, lo mismo sucede con el camino: el mismo camino tiene una longitud diferente desde diferentes puntos de vista.

- ¿Cuál es pues su longitud verdadera?

- ¿Y cuál es el verdadero ángulo desde el cual se ve la campana?

- ¡Qué pregunta más absurda! El verdadero ángulo desde el cual se ve la campana no existe, esto es absurdo. Sólo hay diversos ángulos desde los cuales se puede ver la campana, el primer ángulo, el segundo y el tercero.

- Excelente -dijo Barney-. Lo mismo sucede con relación al camino. No existe una verdadera longitud del camino, esto es absurdo. Sólo existe una longitud que representa el camino desde un punto de vista, el otro, el tercero u otro diferente.

- Es decir, "la longitud que tiene el camino desde diferentes puntos de vista".

- Nosotros tenemos la costumbre de decir brevemente: "la longitud del camino desde un punto de vista determinado". Pero esto es un resultado erróneo porque el camino no tiene longitud, al igual que la campana no tiene ángulo. Solo existe el ángulo bajo el cual se ve la campana desde diversos puntos. De igual manera, resulta correcto afirmar que existe sólo aquella longitud con la cual se presenta el camino desde diversos puntos en movimiento, en relación a su sistema.

El ángulo bajo el cual usted ve la campana, depende de la distancia en la cual se encuentre en relación a la campana. La longitud que parece tener el camino, depende de la velocidad con la que se mueve usted en relación al camino.

- Es decir, según su opinión, ¿el camino no tiene longitud?

- Parece que no.

- ¿Su mesa no tiene longitud?

- No la tiene. Usted y yo vemos la mesa 2 metros de longitud, para aquel transeúnte parece más larga.

- ¿Considera usted, siguiendo el orden de cosas, que bajo el punto de vista del viajero que se dirige desde acá hasta la ciudad, el camino es mayor que desde el punto de vista del observador que no se mueve?

- Así parece.

- Si me traslado en el automóvil lejos de su casa, entonces su casa me parece más larga que como la veo desde aquí.

- Sí.

- ¿Qué influye en nosotros para que creamos en estos conceptos errados?

- Aquí no existen conceptos errados.

- Usted quiere decir ¿que la casa realmente se encuentra más lejos?, ¿qué fuerza la ha movido de su lugar?

- Nada se hizo con la casa. Solo se varió la longitud desde la cual se observa.

- Usted dice: cambia la longitud de la casa, pero con la casa no sucede nada. ¿Qué sucede entonces?

- No se trata de la longitud de la casa, lo que cambia es la longitud con la cual usted la observa. El ángulo desde el cual se ve la campana aumenta cuando usted se acerca a ella, mientras que con la campana no sucede nada. Lo mismo sucede con la casa. Con ella no sucede nada, esto es seguro, la casa no tiene nada que ver con el hecho de que usted se acerque a ella, pero la longitud con la cual se presenta ante usted ha disminuye. El tamaño de esa longitud no sólo depende de la casa sino también de la velocidad del observador en relación a ella.

Sentí que el suelo bajo mis pies comenzaba a tambalearse. Mi sentido común se oponía a la lógica sin sentido de este insensato, pero yo no encontraba argumentos para contraponerlos a los suyos. Me desarmó. Pero yo no me rendí y puse en marcha los demás absurdos.

- ¿Existen los intervalos de tiempo o también son pura ilusión? -pregunté tímidamente.

- Naturalmente, existen de la misma forma que la longitud y el ángulo. ¿Cree usted que el ángulo desde el cual vemos la campana es una ilusión? ¿Y la longitud con la cual se presenta ante nosotros el camino, es una ilusión? Todo esto existe realmente pero todo esto puede cambiar.

- Mire usted, el intervalo de tiempo entre los acontecimientos *O* y *A* desde el punto de vista del observador, que está sentado en el hotel es de 4 horas, pero desde el punto de vista del viajero es de 6 horas. ¿Es esto absurdo? El mismo intervalo de tiempo se aprecia de un modo diferente y no se sabe cuál de los dos es el correcto.

- Usted repite por segunda vez su error anterior -contestó Barney- no se trata de un intervalo de tiempo, sino de dos.

- ¿Por qué dos? Veamos pues: *O* señala la salida del viajero y *A* la falla de su automóvil.

Entonces el intervalo de tiempo entre *O* y *A* es la longitud del viaje desde la salida hasta el accidente. Este intervalo tiene siempre la misma longitud.

- No, tiene dos. La duración del viaje desde el punto de vista del observador, es una, y desde el punto de vista del viajero es otra. Así como los ángulos, bajo los cuales se ve la campana, son diferentes; el ángulo desde el cual es visible desde aquí y el ángulo desde el cual es visible desde otro lugar, son dos ángulos diferentes.

- Es decir, en sentido general, no podemos saber cuánto dura el viaje.

- Este problema no tiene sentido. El observador realiza el viaje en un intervalo de 4 horas, pero el viajero lo realiza en 6 horas. Esto sucede en general.

- Es claro que no existe un intervalo en sí. Solo es posible hablar de los intervalos que determinan dos acontecimientos, el comienzo y el fin del proceso, visto desde el automóvil, desde el tren, desde el hotel, etc.

- Sí.

No luché más y me pregunté por qué Mister Barney que parecía no tenía razón comenzó a convencerme. Pero todavía quedaba un problema sin resolver.

- ¿Pueden existir dos acontecimientos que un observador perciba con una diferencia de tiempo, por ejemplo, de una hora, y el otro observador los perciba sin ningún intervalo de tiempo entre ellos?

- Sí, cuando los observadores se mueven uno en relación al otro. Lo que es simultáneo para uno no es simultáneo para el otro.

- ¡Extraño, más que extraño! -dije con asombro.

- ¿Cómo se expresa usted para ir a su casa? -Dijo Mister Barney- parece que en este caso va a ser víctima de todo un discurso. Decimos: “cinco metros de tela”, “el tiempo tiene una duración de dos horas”, etc., estos son solo apreciaciones subjetivas.

- ¿Y cómo se debe decir, según su cree usted?

- Hay que decir así: “el trozo de tela, que representa para el observador, independiente de su relación a él, cinco metros”; “el tiempo, que significa para el observador independiente de su relación a él, un intervalo de dos horas”.

- Sencillo y difícil -objeté yo.

- Sí, por eso en la conversación corriente se prefiere lo corto a lo preciso. Pero no se debe olvidar, que por eso en el sentido textual de la palabra, la brevedad cambia en parte el sentido.

Mister Barney sonrió.

Me fui muy agitado a mi habitación.

Los médicos se curan solos

No me acosté en seguida, y sentado en una mesa seguí buscando nuevos absurdos para enfrentar al irrazonable Mister Barney. Encontré varios, pero todos ellos desaparecieron cuando recordé las palabras de Barney; “las cosas no tienen longitud, solamente existe la longitud, con la cual las cosas se presentan en relación a los sistemas que se mueven mutuamente uno en relación al otro. Los fenómenos no tienen duración, existe sólo la duración con la cual aparecen los diversos fenómenos de los distintos sucesos que se mueven uno en relación al otro”. Al fin logré encontrar un nuevo absurdo que me condujo a otro todavía más significativo.

Cuando el reloj del viajero indicó las 2 de la tarde (exactamente las 2’ de la Fig. 94) el reloj en el hotel indicó la 1, (exactamente la 1) desde el punto de vista del observador que se encuentra sentado en el hotel. Pero desde el punto de vista del viajero resulta que cuando su reloj indica la 1 en punto (exactamente la 1’), el reloj del hotel indicaba las 2 (exactamente 2). El reloj del viajero marcha en relación al reloj del hotel, y el reloj del hotel marcha en relación al del viajero.

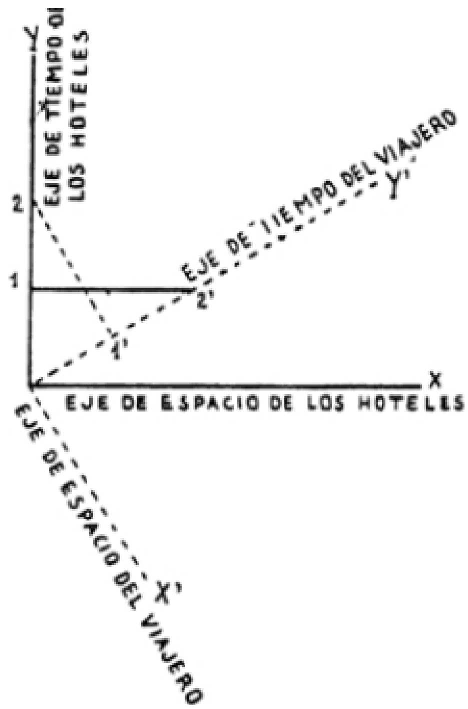


Figura 94

Por medio de este absurdo he encontrado otro. Las cintas métricas, puestas a lo largo del automóvil, tenían desde el punto de vista del observador que se encuentra en el hotel, una longitud de más de 1 metro, pero desde el punto de vista del viajero, la misma cinta, puesta a lo largo del camino, tenía más de 1 metro (Fig. 95). Iván es más alto que Pedro y Pedro es más alto que Iván... ¡absurdo! Logré vencer a Barney.

Mister Barney se había retirado a dormir. Después de haberme disculpado por mi visita tan tarde, expuse con aire solemne ante él, mis descubrimientos.

Me observó fijamente a través de sus gafas.

- Usted parece muy cansado, Mister Harwood, -dijo-, tiene que descansar y recuperarse.

- Mister Barney, no tema por mi salud. Tengo que reconocer que no esperaba oír tal tontería.

- ¿Por qué considera usted una tontería?

- ¿Es que no lo ve? La hora del viajero es mayor que la del hotel, y la hora del hotel es mayor que la del viajero. *A* es mayor que *B* y *B* es mayor que *A*.

- ¿A qué llama usted la hora del viajero?

- Pues puede ser una vuelta completa del minutero alrededor de su reloj.

- ¿Qué quiere decir "una vuelta completa"? ¿Desde qué punto de vista aprecia usted este tiempo?

- Desde cualquier punto de vista...

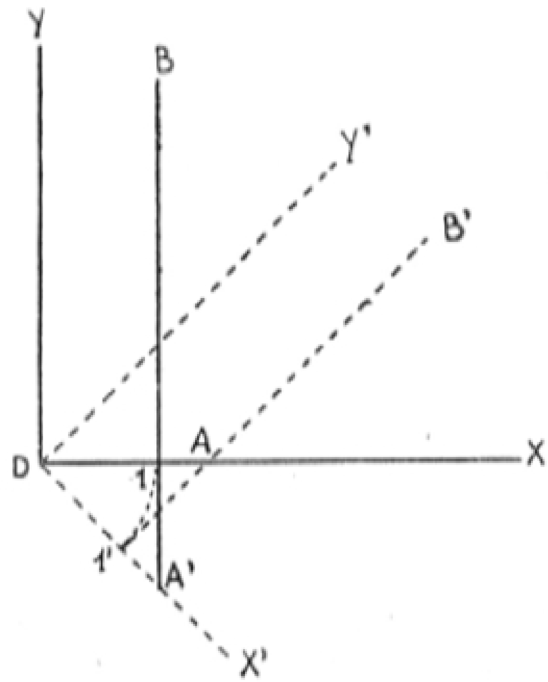


Figura 95

- No tiene sentido lo que está diciendo. La vuelta del minutero no tiene ninguna longitud por sí misma...

- Pues si es tan imprescindible para usted el concepto del "punto de vista" -interrumpí -, entonces consideremos que el tiempo de la vuelta del minutero se aprecia desde el punto de vista del observador que no tiene el cerebro hueco.

Después de esto lamenté inmediatamente haber pronunciado tal grosería; pero Mister Barney no la comprendió.

- No se trata del cerebro -contestó al momento-, sino del hecho de si el observador se mueve en relación al reloj o no.

- ¿Es qué no es lo mismo? No se trata del reloj, sino de las horas.

- No se trata sólo de las horas, sino también de la velocidad con la qué el observador se mueve con relación a ellas. Diversos observadores perciben las vueltas de las manecillas del reloj en diferentes intervalos de tiempo, si ellos se mueven en relación a las horas a diversas velocidades. De no existir intervalos de tiempo por los cuales pase el observador mientras dure este, dicho observador se encuentra en reposo en relación al reloj. Por lo tanto, cada reloj marcha según el punto de vista de cada observador, con excepción del suyo.

- ¿Cómo encontrar una salida a esto? Nunca lo podré creer, ¿cómo es posible que *A* sea mayor que *B*, y que al mismo tiempo *B* sea mayor que *A*? -dije irritado.

- ¡Sí, por qué no! En su ejemplo no se trata de dos cantidades sino de cuatro. La hora del viajero desde su punto de vista, es igual a *A*. La hora del observador, desde el punto de vista del viajero es igual a *B*. Como ya hemos dicho, *A* es menor que *B*. Después, la hora del observador, desde su punto de vista es igual a *C* y la hora del viajero desde el punto de vista del observador es igual a *D*. Como sabemos $C < D$. Por esto $A < C$ y $B = D$. ¿Qué le perturba todavía?

Cuando salí de la habitación de Mister Barney oí que cerraba con el pestillo. Comprendí que por hoy, Mister Barney no quería ocuparse más de las gráficas.

La última confrontación

Por la mañana, una nueva idea me vino como un regalo y junto con ella nació la esperanza.

¡La experiencia! ¡Cómo pude olvidarme de ella, que ha sido siempre la única esperanza de los estudiosos! Cuántas veces los pensamientos humanos fueron conducidos, a pesar de las coartadas en que habían caído, gracias a ella, que no da lugar a esconderse bajo un sofisma ágil. No, Mister Barney "todavía tengo esperanzas".

Tan pronto como escuché en el patio la voz de Mister Barney me dispuse a hablar con él.

- No me rindo, Mister Barney -grité, pues la experiencia es la que decidirá nuestra disputa.

- ¿Qué experiencia?

- Lo más sencillo es: ¡Vámonos! Veremos si las casas cambian sus longitudes según nuestros diversos puntos de vista; caminemos durante intervalos de tiempo, dentro de los cuales ocurren diversos fenómenos…

Mister Barney sonrió:

- ¿Pero, y su viaje a la capital?, preguntó él, ¿usted ya lo ha olvidado?

¡Sí, mi viaje a la capital! Había desaparecido completamente de mi mente. Ante mí se plantearon súbitamente el estiramiento de los caminos, la extraña marcha de mi reloj, las extrañas formas de los viajeros con los que me encontré en el camino, la flexibilidad y la forma cóncava de las ruedas, la leche agria... Ante todo esto comencé a comprender y sentí que había sido vencido en mi confrontación.

Sí, vi los caminos y los caminantes bajo otras longitudes a las que les veo ahora, hice un viaje de seis horas en lugar de dos. De ahí que resultara mi apetito exagerado, de ahí mi enorme gasto de gasolina, por eso se puso agria la leche, por eso se veían tan extraños los viajeros. Los hechos también hablaban en mi contra...

Sin mister Harwood

Dejemos a Mister Harwood en el momento más crítico de su vida. Lo dejamos para siempre.

No es bueno abandonar a un amigo en momentos de peligro. Es todavía peor si el autor deja a su héroe en la desgracia. Pero yo no he escrito un cuento de aventuras sino artículos de vulgarización sobre la teoría de la relatividad. Mister Harwood y Mister Barney intervienen para dar a conocer las ideas fundamentales de Einstein; las cosas no tienen longitud, los fenómenos no tienen duración, y todas aquellas cosas que nosotros percibimos unas con una longitud y otras con otra, sólo dependen de la velocidad a la que nos movemos unos en relación a otros. Esto no es una ilusión, no es un cambio casual; la longitud se cambia realmente, mientras que las cosas permanecen invariables. Lo mismo sucede en relación a la duración de los fenómenos que vivimos.

En el mundo número 2, hacia el cual, para su desgracia, había caído Mister Harwood, esta cualidad se destaca con completa exactitud. Los habitantes oriundos de este mundo -por ejemplo, Mister Barney- se orientan excelentemente en él. Sus conceptos se formaron bajo la influencia de su experiencia y ellos razonan de acuerdo con todos estos hechos.

Otro mundo sería para ellos completamente incomprensible. A Mister Barney le parecería absurdo, que dos acontecimientos que suceden al tiempo para un viajero debían suceder por consiguiente, también al mismo tiempo, para todos. Que todos los viajeros deben ver las mismas longitudes, así como el hecho de que las líneas se mueven en relación a él siempre en una misma dirección.

Algunos filósofos han afirmado que, de acuerdo con los planteamientos de Einstein, la longitud y la duración dependen siempre de la conciencia de los observadores. Esto no es cierto. Los diversos observadores aprecian la longitud de uno u otro objeto y la duración de uno u otro fenómeno, de un modo diferente, pero su apreciación no depende de su estado de conciencia sino de la velocidad relativa a su movimiento. La conciencia del observador consiste en aquel ángulo con el que se ve la campana y no depende del observador elegir este ángulo, sino de su posición en relación a la campana (y como de ahí resulta, de la altura misma de la campana). Del mismo modo, la longitud de las líneas no solo depende de las líneas -como se pensaba antes de Einstein- y tampoco del observador que las mide -como afirmaron algunos filósofos combatiendo a Einstein-, sino de la velocidad del movimiento del observador en relación a la línea.

En un resumen muy acertado, Einstein afirma que en realidad se efectúa un cambio semejante al que sufrió Harwood durante su extraño viaje. Nosotros no percibimos este cambio en la vida cotidiana, porque es demasiado pequeño. Pero imaginemos por un minuto, que todo sucediera tal como se ha descrito en el mundo número 1. ¿Se pueden calificar las particularidades de este mundo como un estado de conciencia del observador? Naturalmente que no. Para todos los viajeros, independientemente de su conciencia, la distancia del hotel de Barney hasta la ciudad, es igual a 200 kilómetros, si cruzan dicha distancia a la velocidad con la cual la recorrió Harwood.

La distancia es diferente si los viajeros marchan a otra velocidad, pero no depende en nada de la conciencia del observador. Lo mismo sucede respecto a la duración de cualquier otro fenómeno. "Ante nosotros se plantea el problema -escribió un autor-; ¿hay o no continuidad objetiva del tiempo o de la longitud, que existe independientemente de las meditaciones de sus observadores? A lo mejor, todo depende de los puntos de vista y entonces vemos aquí una diferencia sería con los fundamentos del materialismo dialéctico".

¿Es así? No lo es. Si la duración y la longitud dependieran del pensamiento del observador, estos conceptos negarían cualquier valor objetivo y deberían ser expulsados del terreno de la física. Según Einstein, la longitud y la duración no dependen de ningún modo del observador. Es cierto que, al explicar la teoría de la relatividad, se habla con bastante frecuencia sobre la longitud y la duración del tiempo "desde el punto de vista de uno u otro observador". Pero aquí solo se hace referencia al observador para revelar algunas correlaciones entre los grandes sistemas que se mueven en relación unos a otros, su correlación nunca depende del observador. Según los viejos conceptos de física, esta correlación dependía únicamente de las cosas mismas; según Einstein, ella depende de la velocidad de estas cosas pero jamás del observador.

No es posible, por ejemplo, decir que una cosa es dos veces más larga que otra, como si al variar su velocidad relativa se cambiaran también la relación entre sus longitudes.

Tampoco es posible decir que según el punto de vista de cualquier observador una línea es tantas veces más larga que otra, porque el observador no tiene absolutamente nada que ver con esto. Hay que decir que: "En el caso de tal y tal velocidad determinada de dos líneas, una de ellas es tantas veces más larga que la otra". En esto consiste que algunos hechos objetivos no dependan de ningún "punto de vista". El observador, en este caso, solo sirve para revelar el suceso.

¿Tiene, pues, la línea una longitud independiente de la que le atribuye el observador? La pregunta no se ha planteado del modo correcto. La línea en general, no tiene ninguna longitud. Pero sin embargo, existe una relación definida entre las longitudes de dos líneas que dependen de la velocidad (de las líneas mismas) y no dependen de ningún observador. Afirmar que en la teoría de la relatividad todo depende de los "puntos de vista", quiere decir que no se comprende esta teoría. En ella todo depende de la velocidad relativa, pero no de los "puntos de vista". Por tal razón, no existe ninguna separación entre el materialismo dialéctico y la teoría de Einstein, pero sí una profunda distancia entre ella y los antiguos conceptos.

Lo que dio a Einstein motivo para afirmar que todas las cosas por sí mismas no tienen longitud y que todos los fenómenos por sí mismos no tienen duración, lo hemos indicado anteriormente.

Ahora el lector puede imaginar concretamente qué es lo que afirma Einstein. Hemos descrito su idea fundamental en nuestras narraciones sobre el mundo número 1.

Por otra parte, el mundo número 1 se distingue esencialmente de nuestro mundo igual que lo dicho por Einstein.

No es difícil familiarizarse con las características del mundo número 1 y aprender a pensar sobre los acontecimientos según sus principios. Pero en él hay una circunstancia con la que resulta imposible reconciliarse. Para resolver esta dificultad he pensado dirigirme a nuestro corresponsal. Y por esta vez he considerado como mi obligación, resolver en su lenguaje este problema. Léase mi escrito.

El fracaso del mundo número 1

Nosotros hemos dado rienda suelta sobre nuestro caballo incansable. Caminos rectos y sinuosos atravesaron espesos bosques. Consideramos inmunda la localidad: decíamos que aquí hay algún misterio. El cochero tenía la mirada acobardada y no cesaba de apresurar al caballo, el cual no obstante, a cada golpe, inclinaba más su cabeza pero aceleraba la marcha. Junto conmigo viajaba Mister Barney. Estaba sentado en el pescante, vuelto hacia mí y con la espalda hacia el caballo hablando conmigo. Súbitamente se volvió, se agarró el pecho y se cayó hacia adelante. (Este suceso se efectuó en el punto *A* de la gráfica).

- ¿Qué le pasó?

- Murió. La bala le atravesó el corazón - dijo el cochero.

- ¿Quién tiró contra él?

- Probablemente este bribón de Clío intentó disparar contra él. (Clío hizo el disparo desde el punto *B*).

- Usted habla de intentar pero la bala ya mató a Mister Barney.

- Sí, le mató. Yo sigo diciendo que su asesino es Clío. Mire usted cómo corre hacia nosotros (punto *C*). Apuesto a que dentro de diez minutos nos ha alcanzado. (Este acontecimiento en el futuro se dará en el punto *O*).

- La fuerza del golpe sacudió al caballo de tiro; pero desgraciadamente este caballo prefería trabajar con la cabeza en vez de las piernas y por lo tanto nuestra velocidad no aumentó. Lancé una mirada hacia atrás. A lo lejos, sobre el camino, se acercaba rápidamente el tirador para alcanzarnos. En todas las curvas del camino levantaba el arma y tiraba, (punto *D*). Súbitamente me encogí y tuve cuidado de echarme hacia abajo en el piso del carruaje.

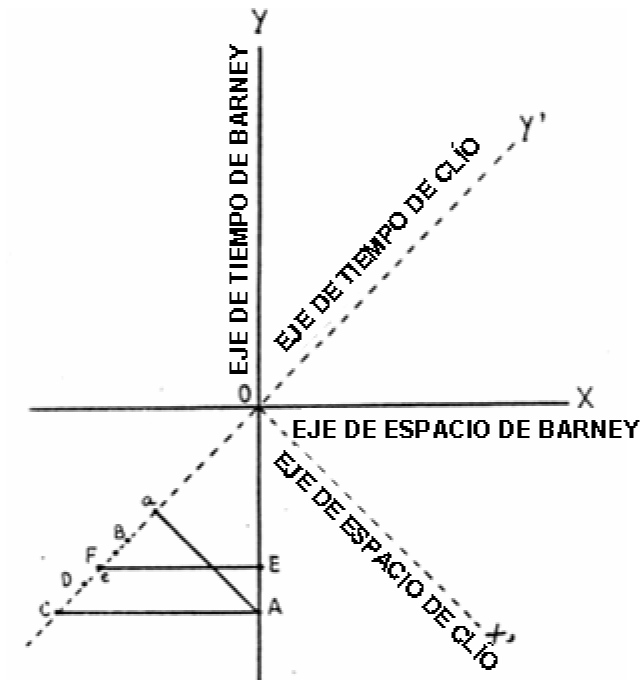


Figura 96

- No tema. El sigue apuntando sobre Barney -dijo el cochero indicando con el dedo hacia el cadáver que estaba echado a mis pies.
- ¿Por qué le dispara si ya está muerto? -contesté.
- ¡Qué hombre más extraño es usted! Si Clío nos persigue, quiere decir que para él, Mister Barney vive aún. La muerte de Barney, según el punto de vista de Clío, sucedió al mismo tiempo que el acontecimiento anterior al suceso *D*).
- Por eso hace falta gritarle -contesté, agarrando el cadáver y haciendo un esfuerzo para bajarle al suelo.
- ¿Por qué le esconde? Ya está muerto -dijo el cochero.

Ante el peligro de cometer más errores por mis apreciaciones y los conceptos que tenía fijados en mi cabeza, y en completa relación con el nuevo mundo al cual me había aferrado firmemente. Me quedé confuso sobre la necedad con la que hablaba el cochero. Súbitamente se apoderó de mí una idea brillante.
- ¡Apártese!, grité, mataré de inmediato con un tiro a ese insensato.

Dicho y hecho. ¡Pam! (Esto sucedió en el punto *E*). Clío cayó muerto. (En el punto *F*).

- No logró tirar -exclamé alegremente-. No salió el tiro que debía disparar a Mister Barney.

- ¡Es decir, que Mister Barney está salvado!

¿Cómo es posible salvarlo si dentro de su corazón tiene una bala? No, no puede revivir, está frío.

- ¿Qué bala? Si Clío no la tiró, nadie puede haberla tirado. ¿Cómo es posible, que en nuestro mundo tan extraño, una bala que nadie ha dejado salir del fusil pueda infiltrarse en el corazón de Mister Barney?

- No, pues... yo no puedo explicarlo -contestó el cochero. En su voz había perturbación- pero usted trata de explicar lo que no le parece comprensible respecto a nuestro mundo. Nosotros mismos pensamos y luchamos e incluso para nosotros ya es demasiado. Esto no está bien, señor...

Verdaderamente no está bien. No es agradable vivir en el mundo en el cual los efectos pueden preceder a las causas. Así llegábamos a reconocer, que el mundo número 1 tiene que sucumbir debido a la ley de la causalidad.

3. El mundo número dos

La organización científica de la fantasía (*OCF*).

Desde las ruinas del mundo número 1 surge ante nosotros la pregunta: ¿es posible un mundo en el cual las cosas por sí mismas no tienen longitud, los fenómenos no tienen duración, y en el cual no existe ninguna sucesión de los acontecimientos? ¿No estará condenado a desaparecer cualquier mundo de este tipo, debido a su colisión con las leyes de la causalidad?

Hemos afirmado que es posible un mundo de este estilo. Lo que indica que hace falta construirlo, es decir, imaginarlo. ¿Pero, cómo se imagina un mundo? Inténtalo lector. Piensa en cualquier cosa nueva: un cuento, un argumento para una narración de aventuras, un esquema para un castillo, una figura para una tela, una melodía musical. Si no fueras un hombre con imaginación permanentemente creadora, te habrías convencido de que tu fantasía resulta pesada y torpemente sujeta a un sólo lugar, plegada a puntos de vista ya oídos, vistos, leídos y que en ellos no hay nada concentrado, nada extraño, nada fantástico…A nuestra “fantasía alada” ¡ay! le hacen falta muletas.

¿Cómo venceremos este infortunio? En la época de la organización científica del trabajo (*OCT*) y de la organización científica del modo de ser (*OCMS*) es natural ocuparse también de la organización científica de la fantasía (*OCF*).

La Matemática inventó la cuarta dimensión, la Geometría descriptiva los números imaginarios, y otras maravillas. Todas estas cosas pueden parecer muy aburridas pero por su grandeza y organización dejan detrás de sí la más afortunada idea de un autor de una novela fantástica. ¿Es posible que un profesor de Matemáticas esté dotado de una imaginación más rica que los maestros profesionales de las creaciones fabulosas, los escritores? Parece que no. Pero los escritores son artistas y los profesores de Matemáticas crean fantasías científicas.

Nosotros debemos seguir los ejemplos de los matemáticos y transformarlos en ciencia -expresada exactamente- en la organización matemática de la fantasía. Acá tenemos algunos ejemplos en este sentido: el mundo número 1 fue imaginado de un modo matemático. Nosotros lo creamos (apoyado por Mister Barney) dando una imagen exacta de forma gráfica, de los acontecimientos de este mundo desde el punto de vista de los diversos observadores, que se mueven uno en relación al otro. Todas nuestras ficciones están incluidas en el hecho de que hemos supuesto que el eje del espacio siempre debe ser perpendicular al eje del tiempo. ¿Por qué necesariamente perpendicular? La pregunta es incorrecta. La fantasía tiene derecho a imaginar todo lo que la complace, sólo que en sus representaciones, en el caso del mundo número 1, no había previsto el absurdo lógico o el choque con la ley de la causalidad. Es cierto que la estructura de las bases gráficas del mundo número 1 contienen este choque. Es decir que la estructura es defectuosa. Es conveniente rectificarla y sentar un nuevo principio cuya experiencia es completamente arbitraria pero la cual da la posibilidad de estar siempre de acuerdo con la ley de la causalidad.

La estructura del mundo número 2

Cualquier observador aprecia el lugar y el tiempo de cualquier acontecimiento que sucede en algunos puntos de sus ejes de espacio y de tiempo *OX* y *OY*. Estos ejes no tienen que ser necesariamente perpendiculares, uno en relación al otro (Fig. 97).

Para describir de un modo gráfico el acontecimiento *A*, el cual sucedió dos horas después del primer acontecimiento *O*, a 200 kilómetros de distancia, el observador obra del siguiente modo: contando en el eje del tiempo, hacia arriba, desde el punto *O*, dos secciones (cada sección corresponde en las escalas que hemos fijado, a una hora) y tirando una recta paralela al eje del espacio: este lugar geométrico del punto de encuentro, indica el acontecimiento visto desde el punto de vista de un observador dos horas después del momento de salida.

Después se indican dos secciones en el eje del espacio, a la derecha del punto *O* (cada sección corresponde a 100 kilómetros, en las escalas que hemos fijado) y se traza una recta paralela al eje del tiempo: este lugar geométrico del punto de encuentro indica los acontecimientos que se realizaron desde el punto de vista del observador a 200 kilómetros de distancia, desde el acontecimiento inicial. En la intersección de las rectas *BB′* con *CC′* se encuentra el punto del acontecimiento que nos interesa. Es fácil comprender que la recta *OA* representa la gráfica del movimiento de los puntos que en el momento inicial, *O*, se encontraban frente al observador y que se mueven con una velocidad de 100 kilómetros por hora.

La recta *OY* es la gráfica del movimiento del observador mismo. Mirando desde el punto de vista de otro observador que se nueve juntamente con el punto *A*, la recta *OA*, que representa la gráfica de su movimiento, es entonces su eje de tiempo. ¿Qué recta forma entonces su eje de espacio?

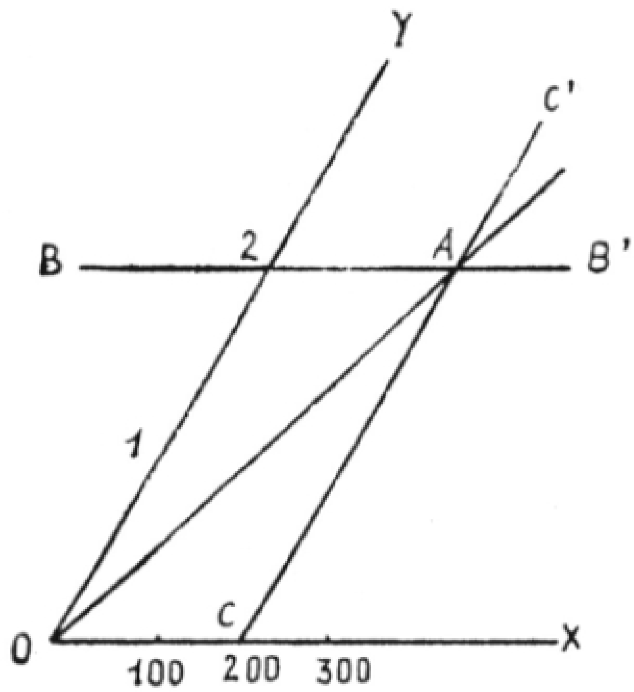


Figura 97

No insistimos en la reivindicación de que el eje del espacio debe ser perpendicular al eje del tiempo como lo hizo Mister Barney. Pero tampoco seguimos lo que Mister Harwood propuso como norma, que el eje del espacio tenía que ser el mismo para todos los observadores. Sin embargo, introducimos para la solución de este problema nuevas condiciones (Fig. 98).

Trazamos la bisectriz del ángulo *XOY* (en la recta *OZ*). El eje del espacio y del tiempo es simétrico en relación a *OZ*. Fijamos como ley del nuevo mundo, el principio siguiente: el eje del espacio debe ser siempre simétrico al eje del tiempo en relación a la recta *OZ*. De este modo, para el segundo observador, la recta *OX'*es el eje del espacio es.

¿Qué representa la recta *OZ*? Representa la gráfica de cualquier movimiento. Desde el punto de vista del primer observador, la velocidad de este movimiento es igual a 300 kilómetros por hora. Desde el punto de vista del segundo observador el punto *Z* pasa en el intervalo de tiempo, indicado por el segmento *Ot*, el segmento *Os* indica el espacio, y es igual a *Ot*.[1]

[1] En el paralelogramo *OtZ's* la diagonal *OZ'* corta el ángulo *O* por la mitad: de ahí resulta que *OtZ1s* es un rombo y *Ot* = *Os*.

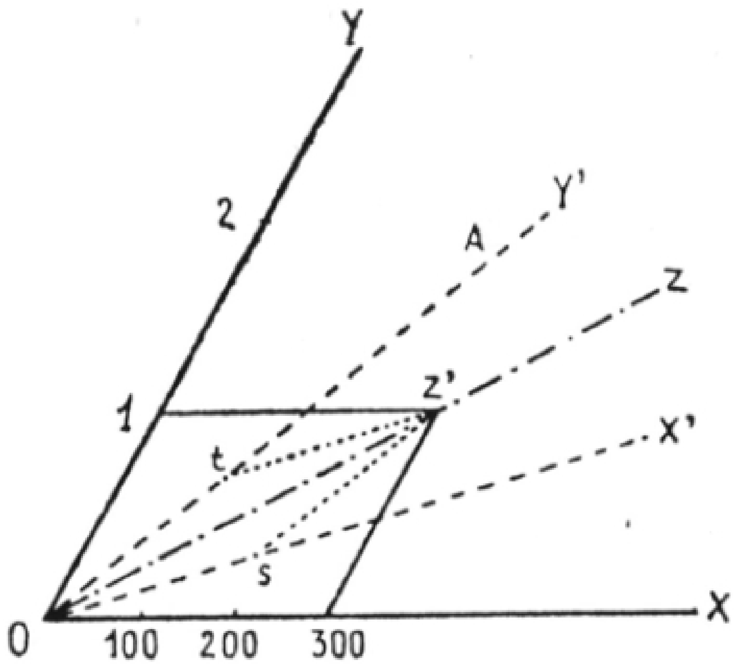


Figura 98

El segundo observador plantea el problema sobre la escala en los ejes de tiempo y de espacio tal como hemos indicado; pero si planteamos como ley del nuevo mundo que la correlación entre las escalas de las unidades para los ejes del tiempo y del espacio, deben ser iguales, es decir, que el segmento que significa 1 hora en el eje de tiempo, debe significar 300 kilómetros en el eje del espacio. En este caso, en lo que concierne al segundo observador, la recta *OZ* también representa la gráfica del movimiento que se efectúa con una velocidad de 300 kilómetros por hora. Este movimiento juega un papel particular en nuestro mundo: todos los observadores que se mueven aprecian su velocidad completamente igual, es decir, 300 kilómetros por hora.

Trazamos además la bisectriz del ángulo adyacente al ángulo *XOY* (*OZ'* en el Fig. 99).

¿Qué significa esta recta? Desde el punto de vista de nuestro observador significa que el intervalo de tiempo se mide por el segmento *Ot*, el punto Z'_1, antigua distancia que se mide por el segmento *Os'*, igual al segmento *Os*, y que indica la distancia que sale del punto Z'_1 se aplica al mismo tiempo al espacio de tiempo, que tiene una dirección opuesta.

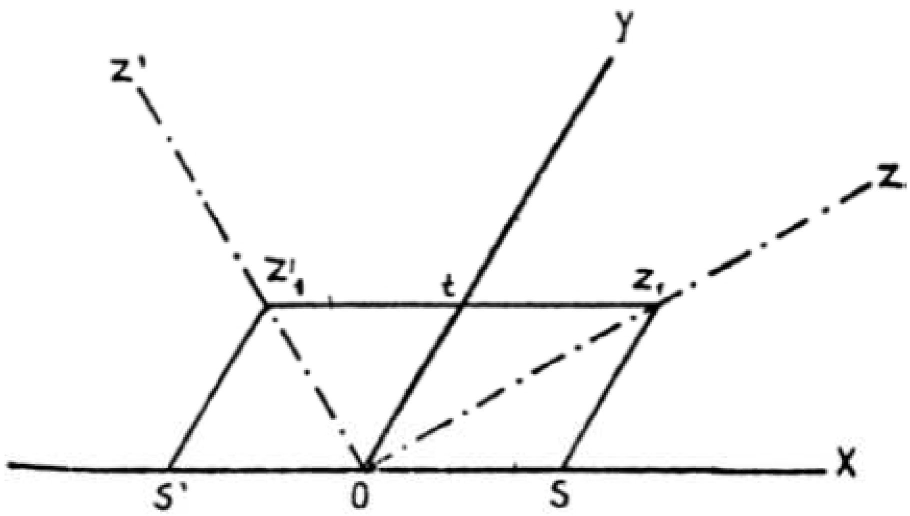


Figura 99

Es decir, que desde el punto de vista de nuestro observador Z'_1 se mueve con la misma velocidad de Z_1 pero en dirección contraria: decimos que Z_1, va en dirección hacia adelante, y Z'_1, dirección hacia atrás. De este modo, todos los observadores, independientes de la forma en que se mueven uno en relación al otro, aprecian la velocidad del punto Z_1 menor de 300 kilómetros por hora.

Decimos que la velocidad de 300 kilómetros por hora, el límite de velocidad en nuestro mundo: nadie puede moverse con mayor velocidad. Esto quiere decir que la gráfica de todo el movimiento debe estar dentro del ángulo *ZOZ'*. De aquí, por consiguiente, debe salir una línea recta que describa los ejes de tiempo de los diversos observadores. Todos los ejes de espacio deben encontrarse fuera de este ángulo.

Hemos expuesto la ley fundamental del mundo número 2. Ahora podemos efectuar las investigaciones, pero ante todo tenemos que comprobar que nuestro mundo no sucumbe bajo el peligro que representan las leyes de la causalidad.

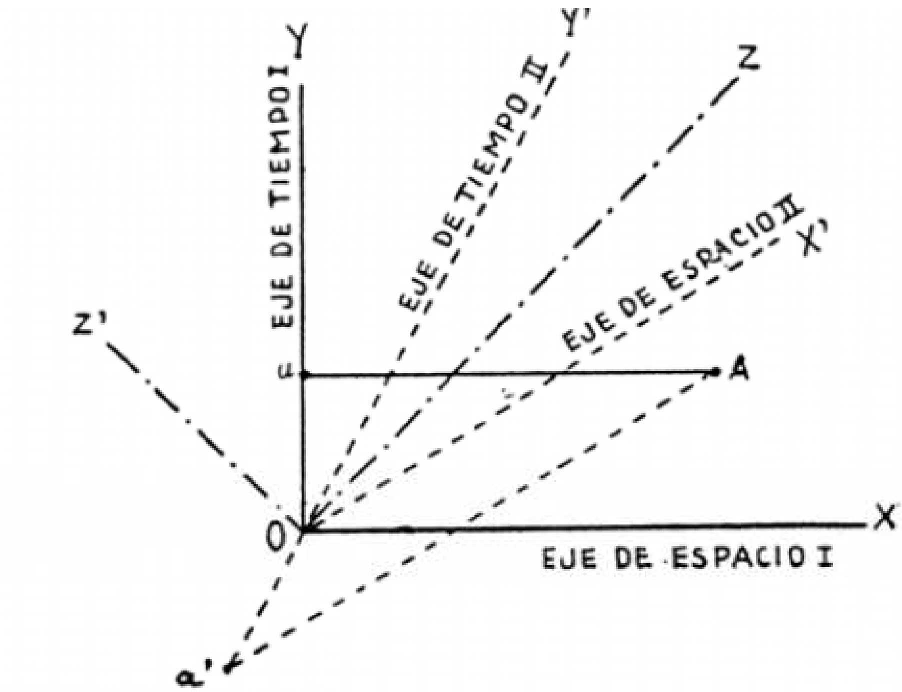


Figura 100

El acontecimiento *A* (Fig. 100) sucedió desde el punto de vista de un observador en el momento *a*, es decir más tarde que *O*. desde el punto de vista de otro observador este acontecimiento sucedió en el momento *a'*, es decir, más temprano que *O*. De esta forma, la sucesión de los acontecimientos *O* y *A* depende de la velocidad con la que se mueven los observadores. Si el acontecimiento *A*, puede ocasionar el acontecimiento *O*, se confirma que desde el punto de vista del segundo observador, el efecto precede a la causa: el mundo número 2 comparte el infortunio del mundo número 1. Si por ejemplo, el acontecimiento *O* representa el disparo y *A* el asesinato producido por el tiro, entonces, desde el punto de vista del segundo observador, el asesinato se efectúa antes de su realización. Sin embargo, en este caso la recta *OA* es la gráfica del movimiento de la bala, es decir que la velocidad de la bala debe ser mayor que la prevista, lo que según las leyes del mundo número 2 es imposible, por lo tanto, la ley sobre el límite de velocidad evita entrar en conflicto con la ley de la causalidad.

Por lo tanto, en el mundo número 2 es completamente posible, es decir, que este mundo se encuentra libre de contradicciones internas. En él, jamás podría responder un americano a la pregunta de por qué su Dios omnipotente perdió seis días para la creación del mundo: "debido al atraso técnico del arte de la construcción, tal velocidad fue considerada en aquellos tiempos como un récord". Ahora se ha batido este récord bíblico. Por cierto, que no hemos creado ni la bóveda celeste ni el firmamento de la tierra, ni las estrellas ni los planetas, en su lugar hemos construido el espacio y el tiempo, lo que, según la Biblia, no hizo ni el mismo Dios.

Para terminar la construcción del mundo nuevo quedan por fijar las normas para determinar las escalas de los nuevos ejes de tiempo y espacio. Intentamos ampliar esta explicación de un modo más razonable. Imaginemos que algunos viajeros: es decir, *I*, *II*, *III*, etc. que salen juntos al mismo camino, ajustan en el momento de la partida, todos sus relojes en el punto *O*.

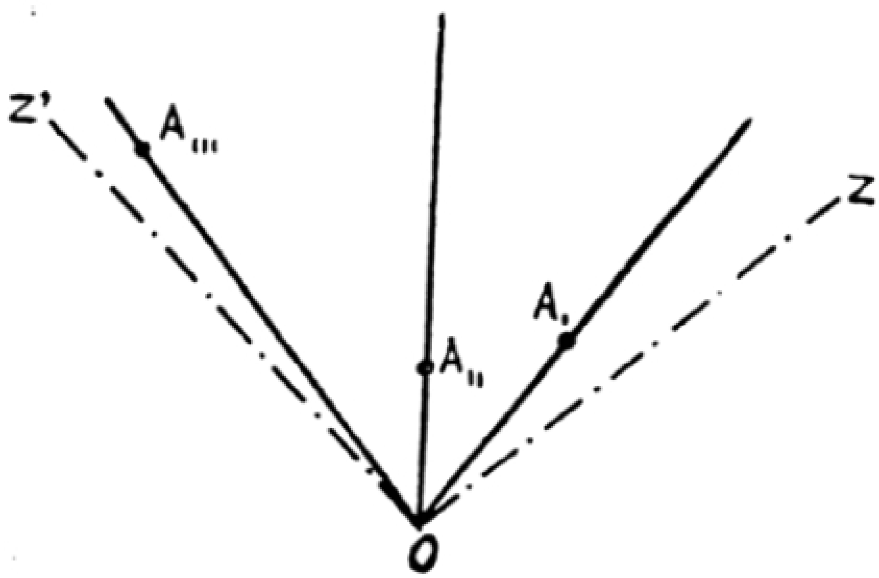


Figura 101

Este acontecimiento se efectúa en la Fig. 101, en el punto *O*. Después de eso, nuestros viajeros se ponen en marcha. Las manecillas de sus relojes se mueven y así el reloj del viajero número *A* indica la *I*. Este acontecimiento (su lugar y tiempo) coinciden en nuestra gráfica con el punto A_1. De igual manera, el punto A_{11} análogamente sucede a las *II*, y el punto A_{111} a las *III* y así sucesivamente. No hay ninguna base para creer que todos estos acontecimientos, sucedan simultáneamente desde el punto de vista de uno de los viajeros, ya que tendrían que ser simultáneos para todos: pues lo que es simultáneo para uno no es simultáneo para otros. ¿Cómo encontrar la posición de los puntos A_1, A_{11}, A_{111} y sucesivamente?

Evidentemente, uno de ellos, por ejemplo, A_1, se puede elegir arbitrariamente, y del mismo modo elegimos la escala de las otras figuras. Haciendo esto intentamos también determinar la posición del punto A_{11}. Sin embargo, si nos ubicamos en el punto de vista del observador *B*, con relación al cual los viajeros *I* y *II* se mueven con la misma velocidad, pero hacia el lado completamente opuesto. El observador estima que los relojes *I* y *II* simultáneamente, (desde su punto de vista) deben coincidir con uno y otro tiempo, pero el observador tiene que darse cuenta de que la marcha de los relojes no depende de la velocidad con la cual se mueven en relación a él sino también hacia qué lado se mueve. Debemos reconocer la hipótesis *B* en su sentido completo. En tales casos, los puntos A_1 y A_{11} deben encontrarse en la recta, paralela al eje del espacio del observador *B* (Fig. 102).

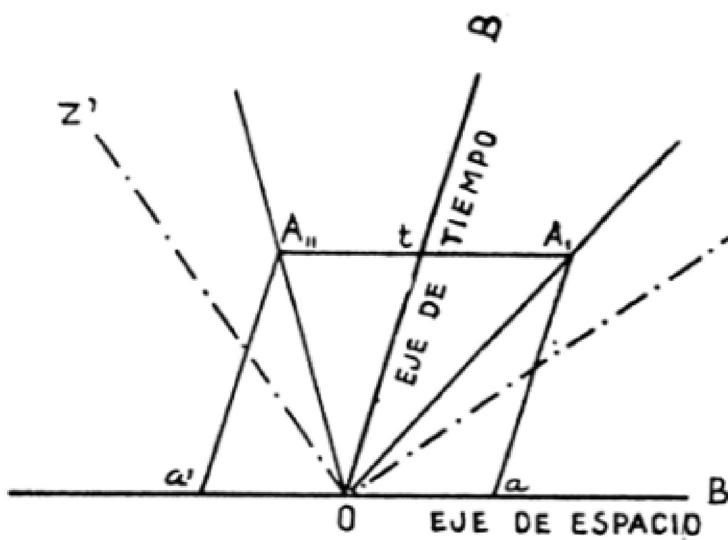


Figura 102

Del mismo modo se puede trazar los puntos A_3, A_4, etc. Al terminar la construcción parece que todos los puntos se encuentran en la línea curva que se muestra en la Fig. 103. Esta curva representa en sí una ramificación de la hipérbola isósceles. Con ayuda de nuestra hipérbola podemos fijar una escala en los ejes de tiempo que nos sirve, igual que la circunferencia trazada anteriormente, para el mismo fin. Igualmente podemos, con ayuda de otra hipérbola, fijar las escalas para el eje del espacio.

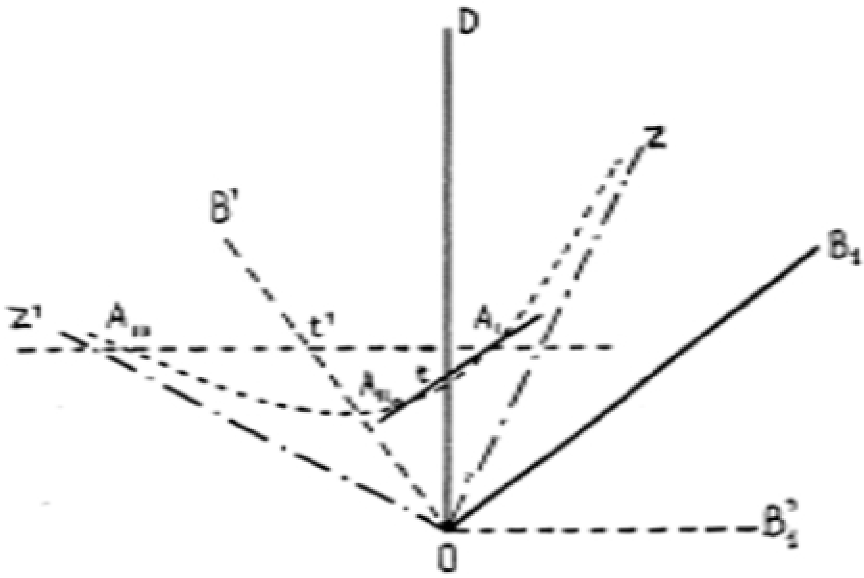


Figura 103

Es cierto que en el mundo número 2, igual que en el mundo número 1, la longitud es un concepto relativo. Para el viajero II, el intervalo de tiempo entre los acontecimientos *O* y *A* es aproximadamente igual á 70 minutos y para el viajero I es igual á 1 hora (Fig. 104).

Recíprocamente, 1 hora del viajero II es, desde el punto de vista del viajero I, igual a 70 minutos. Cada uno de ellos considera que el reloj del otro se ha quedado atrasado.

Como puede verse se efectúan aquí acontecimientos contrarios a aquellos que sucedían en el mundo número 1, donde cada viajero pensaba que el reloj del otro se adelantaba. En este mundo relativo también existen los conceptos de simultaneidad y longitud.

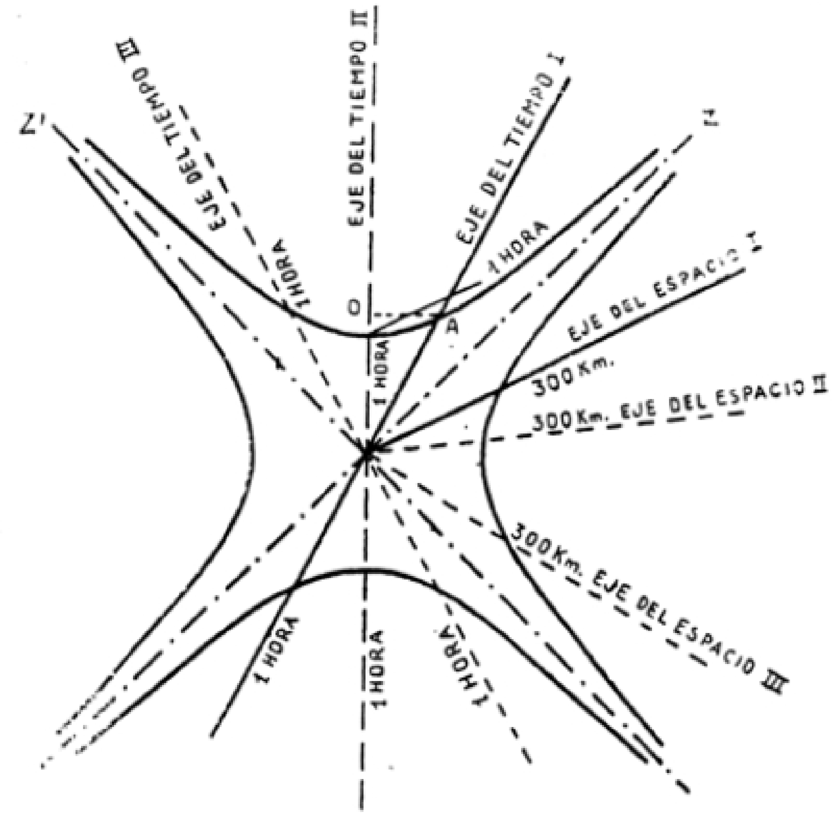


Figura 104

El viaje del nuevo Harwood

Ahora podemos trasladar a este mundo nuevo a nuestro héroe Harwood.

Pero sería algo aburrido, forzarlo a repetir todo desde el comienzo y sería demasiado pesado someter su razonamiento ya desarrollado, a toda una serie de exámenes adicionales. Por esto nos limitamos a una breve descripción del viaje del nuevo Harwood desde el hotel del nuevo Barney hasta la nueva ciudad.

En la Fig. 105 el punto *O* representa la salida del nuevo Harwood desde el hotel a la ciudad, el punto *A* es la llegada de Mister Harwood número 2 a la ciudad, el punto *B* es su salida en dirección contraria y el punto *C* su regreso al hotel.

Los puntos *O* y *C* indican nuestros hoteles en diversos momentos; por esto la recta *OC* es el lugar geométrico que representa los hoteles. De igual manera, *AB* es el lugar geométrico de los puntos que indican la ciudad. Como la ciudad y el hotel están inmóviles uno en relación al otro, las rectas *AB* y *OC* son paralelas. Los puntos de la recta *OA* indican a Harwood número 2 en su camino a la ciudad.

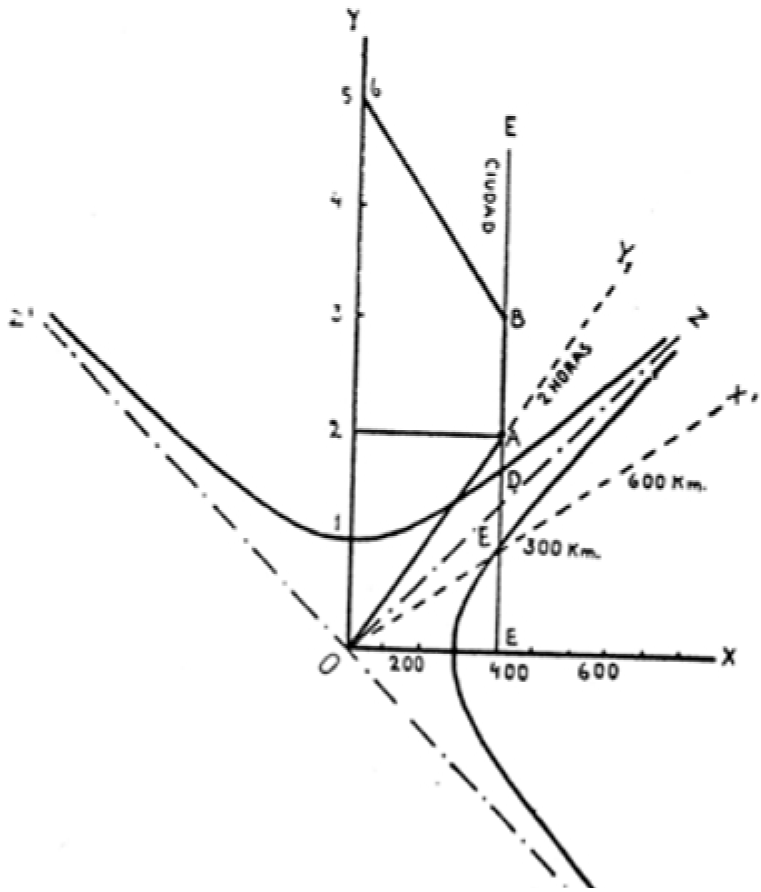


Figura 105

Los puntos de la recta *BC* indican el camino de regreso al hotel de Harwood número 2.

Admitimos que junto con Mister Harwood número 2, desde el hotel se envía a la ciudad un mensaje que viaja una velocidad acelerada (por ejemplo, un radiotelegrama anunciando la llegada de nuestro viajero).

El envío de la señal se hace desde el punto *O*. Llega a la capital en el punto *D*. La recta *OZ* es la gráfica de la velocidad acelerada. Perpendicular a ella se encuentra la recta *OZ'* que indica la velocidad acelerada en dirección opuesta.

Aplicamos al final la escala de la hipérbola para el tiempo y el espacio y dejamos la literatura escrita para acercarnos a los acontecimientos reales.

Ante todo nos encontramos en el punto de vista de un observador que se encuentra en reposo en relación al hotel.

Para que pueda ver los acontecimientos hace falta conducirlos a los ejes de coordenadas.

La recta *OC* (Fig. 105), los puntos que indican donde se encuentra exactamente el observador en cada momento, es su eje de tiempo. La recta perpendicular a ella, *OX*, es su eje de espacio.

Desde el punto de vista del observador, la distancia hasta la ciudad corresponde al segmento *OE* y es igual a 400 kilómetros. El viajero llega a la ciudad dos horas después de su partida.[2]

Desde el punto de vista del viajero sucedió otra cosa. Su eje de tiempo es la recta *OA*; por consiguiente, su eje de espacio es *OX*. La distancia desde los hoteles hasta las ciudades está indicada por los segmentos *OE'* igual a 300 kilómetros. El viajero llegó a la ciudad una hora y media después de su salida del hotel. Por esta razón, el la longitud del trayecto que recorre el viajero el viajero y el camino entre el hotel y la ciudad, son menores que las que aprecia el observador, que se encuentra en posición de reposo en relación a ella. El intervalo exacto de tiempo mediante el cual el viajero calcula su viaje, es menor que el intervalo de tiempo con el cual el mismo viajero observa al observador que se mueve en relación al primero. Es decir, que en el mundo número 2 los objetos no tienen longitud y los fenómenos no tienen duración: la longitud con la cual ve un observador la línea con relación a la que se mueve, es menor (en el mundo número 1 fue mayor) que la que ve el observador que está en reposo en relación a ella. Lo mismo ocurre para el intervalo de tiempo en el cual los diversos observadores ven el mismo fenómeno: para el observador en reposo en relación al lugar en el cual sucede el fenómeno, se realiza en un intervalo mayor (en el mundo número 1, por el contrario, en un intervalo menor).

Los viajeros que encuentra en su camino con Mister Harwood número 2 y que van en dirección contraria, no parecen alargados sino aplastados (véase viñeta al final del capítulo).

---

[2] Para lograr exactitud en los trazos hemos fijado la velocidad del nuevo Harwood, igual a 200 kilómetros por hora, y por lo tanto, hemos variado también todas las demás cifras en relación a ella.

La leche que llevó consigo el nuevo Mister Harwood quedó, al regreso, aun más fresca que la que quedó en el hotel. El mismo Mister Harwood necesitó 3 horas para recorrer el camino y 1 hora en la ciudad, regresando al hotel, en donde se había calculado su viaje en 5 horas. De tal manera que Mister Harwood vivió en el espacio de tiempo de 4 horas lo mismo que vivieron los observadores en el hotel, durante 5 horas. Si hubiera viajado durante más tiempo y a mayor velocidad, hubiera ahorrado aún más tiempo.

Cualquier observador del mundo número 2, que quiera saber lo que va a pasar en 100 años puede satisfacer su curiosidad "saltando al futuro". Para eso se debe lanzar a un viaje con una velocidad cercana a la velocidad límite y regresar luego.

Cuanto más cercana es su velocidad a la velocidad límite, tanto más rápido logra su cometido. Si, por ejemplo, marcha a una velocidad de 298,5 kilómetros por hora, entonces al efectuar el viaje (de ida y vuelta) se adelanta 10 años en los 100 años de marcha. Se reúne con hombres nuevos, que sólo por los libros, saben lo que pasó 100 años atrás, en los caminos por los cuales pasó "el viajero hacia el futuro". Este viajero ve nuevos hechos, nuevas ciudades, nuevas costumbres y nuevos adelantos de la ciencia y de la técnica. Satisface por completo su interés. Pero si este "viajero en el tiempo" quiere regresar desde el futuro, hacia sus antiguos amigos y conocidos, esto resulta casi imposible: únicamente puede ver sus tumbas olvidadas. La "máquina del tiempo" del mundo número 2 se mueve únicamente hacia adelante.

Las palabras dejan paso libre a los hechos

¿Qué es lo extraño del mundo número 2? Se parece al mundo en que vivimos; sólo que la velocidad límite de nuestro mundo no es de 300 kilómetros por hora sino de 300.000 kilómetros por segundo. Esta es la única diferencia. Aquellos extraños fenómenos, que suceden al viajero en el mundo número 2, nos suceden también a nosotros si vamos en un tranvía, en un tren, o en un automóvil. Sin embargo, las medidas son diferentes a las del mundo número 2, debido a que la velocidad con la que nosotros nos movemos es mucho menor que la velocidad límite. El tiempo con el cual se mueve un tren se distingue mucho del tiempo en el cual se encuentra parado en una estación, pero en su viaje desde Leningrado hasta Moscú, estas paradas no exceden de 2×10^{-10} segundos. En comparación con la velocidad límite, esto es imperceptible, aún para la medida más exacta. Para los pasajeros que van desde Leningrado a Moscú, las proporciones de todos los fenómenos que aparecen en reposo en relación al terraplén del tren o que parecen marchar en dirección opuesta al tren, parecen más cortas si se efectúan en la dirección del movimiento, pero si el tren corre a toda marcha, a una velocidad de 100 kilómetros por hora, entonces la longitud de todo el camino desde Leningrado a Moscú, le parece al pasajero 3 millonésimas de fracción de milímetro más corto. No es posible apreciar esta pequeñísima variación de la longitud.

¿Qué derecho tenemos a afirmar que se efectúa en realidad esta transformación absolutamente imperceptible de la longitud y de la duración?

Este hecho real nos da aporta un excelente experiencia que hace unos cincuenta años, produjo gran confusión entre los físicos.

Cuando se encuentran dos trenes de los cuales uno marcha con una velocidad v_1, y el otro con velocidad v_2, entonces la velocidad de uno en relación al otro es igual a $v_1 + v_2$.

Si un tren se adelanta al otro entonces su velocidad relativa es igual a $v_1 - v_2$. Con base en esto se funda la afirmación de que la velocidad de la luz en relación al observador que se mueve en dirección hacia los rayos de la luz debe ser mayor y que la velocidad de la luz en relación al observador que se aleja de las fuentes de la luz, debe ser menor que la velocidad en relación al observador que está en reposo. En otras palabras: si la velocidad de la luz en relación al observador que se encuentra en reposo se indica por c, y la velocidad del observador se indica por v, entonces cuando el observador se acerca a la fuente de luz, verá que la luz se mueve en relación a él con una velocidad igual a $c + v$, pero si se aleja de la fuente de luz, verá que la luz se desplaza a una velocidad de $c - v$.

Esto parece una repetición de todos los conceptos conocidos.

Pero en 1.887 el inventor americano Michelson elaboró sus grandes experimentos,[3] a base de los cuales se pudo sacar la conclusión de que la velocidad de la luz en

[3] Albert Abraham Michelson (1.852 – 1.931). Físico estadounidense, conocido por sus trabajos acerca de la velocidad de la luz. Recibió el Premio Nobel de Física en 1.907.

relación al observador depende de si se mueve el observador al encuentro del rayo de la luz o se aparta de él en dirección contraria.

Gracias a estos resultados inesperados no se puede permanecer en los viejos conceptos sobre la estructura del mundo; sin embargo, el resultado es absolutamente comprensible si nuestro mundo opera como el mundo número 2. Ya hemos dicho que en el mundo número 2 existe una velocidad limitada, que todos los observadores que se mueven unos en relación a otros, aprecian la velocidad de un modo similar. Sólo resta decir que nuestro mundo es el número 2 y que la luz se dispersa con una velocidad limitada, resolviéndose por sí mismo el enigma que nos plantea Michelson.

Albert Einstein propuso exactamente esta explicación del resultado inesperado de la experiencia de Michelson.

Así se creó (en el año 1.904) la "teoría especial de relatividad". Posteriormente (en el año 1.916), Einstein desarrolló su propia teoría, encontrando la salida al hecho de que la construcción del mundo depende de la masa de la gravedad perdida y así en las partes del espacio, completamente alejadas de los grandes cuerpos celestes, coincide la cimentación de nuestro mundo con la construcción del mundo número 2; cerca de los cuerpos celestes nuestro mundo se diferencia tanto más fuertemente de la construcción del mundo número 2, cuanto mayor es la fuerza de gravedad en estos lugares. Cerca de la superficie de la tierra, son insignificantes las diferencias entre las características del espacio y del tiempo de nuestro mundo real y las características del espacio y del tiempo del mundo número 2; de igual manera, la fuerza de la gravedad en la tierra es, en general, comparativamente pequeña.

No podemos hacer aquí un relato de esta "teoría general de la relatividad" y nos conformamos con saber que nuestro artículo ha facilitado al lector la asimilación de las ideas fundamentales de Einstein: los objetos por sí mismos *no tienen dimensión*

Edward Williams Morley (1.838 – 1.923). Químico y físico estadounidense. Su mayor contribución a la física fue el experimento hecho en colaboración con Albert Michelson, para probar la existencia del éter. El resultado fallido del experimento constituyó las bases sobre las que Einstein realizaría la teoría de la relatividad especial.

Morley también trabajó en la composición de la atmósfera terrestre, la expansión térmica y la velocidad de la luz en un campo magnético.

El experimento de Michelson y Morley fue uno de los más importantes y famosos de la historia de la física. Fue realizado en 1.887 por Albert Abraham Michelson y Edward Morley, y se considera como la primera prueba contra la teoría del éter. El resultado del experimento constituiría posteriormente la base experimental de la teoría de la relatividad especial de Einstein.

(N. del E.)

y los fenómenos *no tienen duración*: los diversos observadores que se mueven uno en relación al otro, aprecian de diferente modo tanto la dimensión de las cosas como la duración de uno u otro fenómeno.