

Universidad de Buenos Aires
Facultad de Ciencias Exactas y Naturales

Exactas con la Sociedad
2008-2009

**Laboratorio Itinerante de Termodinámica,
Magnetismo y Física a Bajas Temperaturas**

Una guía práctica para alumnos y profesores secundarios
con explicaciones y actividades sugeridas



Dr. Guillermo Jorge

Jefe de Trabajos Prácticos (FCEyN-UBA), Investigador (UBA, CONICET)

Lic. Claudio Chilotte

Docente auxiliar (FCEyN-UBA), Becario doctoral (UBA)

Leonardo Mingari

Docente auxiliar (CBC-UBA), Becario "Exactas con la sociedad" (FCEyN-UBA)

Laboratorio Itinerante de Termodinámica, Magnetismo y Física a Bajas Temperaturas

Una guía práctica para alumnos y profesores secundarios con explicaciones y actividades sugeridas

© Guillermo Jorge, Claudio Chilotte y Leonardo Mingari.
Departamento de Física, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires.
Todos los derechos reservados.

Esta guía ha sido elaborada con el objeto de ser utilizada en el programa “Exactas con la Sociedad” 2008-2009. Profesores y alumnos secundarios están autorizados a reproducir y utilizar el material impreso en este escrito libremente, siempre que sea un uso académico, no comercial y se mencione debidamente su procedencia. Cualquier otro uso queda terminantemente prohibido.

Primera edición impresa en Agosto de 2009.

Edición electrónica disponible en:
www.lbt.df.uba.ar/escuelas/

Índice

Índice	3
A manera de introducción	4
1- El Nitrógeno Líquido	5
2- Arrugando globos	9
3- Experimentos en frío	12
4- Motores térmicos	16
5- El pajarito bebedor de Homero Simpson	21
6-El motor de Stirling	24
7-Imanes en todas partes	29
8-Trenes que levitan	34
Unas palabras finales	39
Información sobre carreras científicas en la UBA ...	40

A manera de introducción

Este escrito no intenta ser nada más que un complemento a la muestra “*Laboratorio itinerante de termodinámica, magnetismo y física a bajas temperaturas*”, que seguramente ha presenciado si está leyendo esto. La muestra es un proyecto que nace en el Laboratorio de Bajas Temperaturas (LBT) del Departamento de Física, Facultad de Ciencia Exactas y Naturales (FCEyN) de la Universidad de Buenos Aires (UBA). En un principio, la muestra estaba orientada hacia experimentos con nitrógeno líquido exclusivamente, y eran demostraciones que se realizaban internamente en el LBT. Con el paso de los años, la muestra se fue ampliando y se agregaron temas y demostraciones, y fue presentada en varias “Semanas de la Física” y otras actividades de la FCEyN, incluso también en la Feria del Libro de Buenos Aires. Con el tiempo hemos decidido que la muestra debía salir definitivamente del ámbito universitario y debía comenzar a ser presentada en colegios secundarios y otros ámbitos educativos de la ciudad y el conurbano bonaerense. De esta manera nace el “*Laboratorio itinerante de termodinámica, magnetismo y física a bajas temperaturas*”, en el marco de los proyectos “*Exactas con la Sociedad*” de la FCEyN-UBA.

El laboratorio se ha pensado con varios objetivos en mente. Primero, para llegar a escuelas geográficamente alejadas de la FCEyN-UBA, que no poseen habitualmente la posibilidad de acercarse a algunos de los proyectos de extensión universitaria generados en ella. Segundo, para poder acercar a las escuelas una visión distinta de la física con experimentos que raramente podrían ver en un laboratorio de ciencias escolar. Con esto último también se pretende interesar al alumnado y a los profesores a realizar trabajo experimental en sus respectivos laboratorios, utilizando para ello materiales comunes, fácilmente disponibles. Finalmente, para generar un interés en el alumnado hacia la actividad científica, mostrándoles que puede ser muy apasionante, y que puede ser (pensando en su futuro como universitarios) una alternativa válida a las carreras tradicionales que a veces se elijen sólo por desconocimiento de otras perspectivas.

En esta guía encontrará explicaciones sencillas sobre las demostraciones realizadas en el aula, sin pretender por esto hacer una descripción detallada de todos los fenómenos observados. La hemos dividido en diferentes capítulos de acuerdo al tema, y sólo exponemos una explicación básica del fenómeno, y que podrá ser profundizada a través de las actividades y la bibliografía sugerida en cada capítulo. También al final de cada capítulo se proponen diversas actividades que pueden ser realizadas en el laboratorio escolar con la ayuda del profesor de ciencias.

Invitamos a todos los que, motivados por esta muestra, lleven adelante proyectos de laboratorio (ya sea los que sugerimos en la guía, u otros que platee el grupo o el profesor), a enviar sus comentarios, resultados, material de consulta, etc., a través del correo electrónico a: gjorge@df.uba.ar, o por correo tradicional a:

G. Jorge. Laboratorio de Bajas Temperaturas. FCEyN-UBA. Av Cantilo S/N, Pabellón 1, Ciudad Universitaria, 1428, Buenos Aires, Argentina.

Desde ya, esperamos que este material sea la puerta de entrada a un apasionante mundo: el mundo de la ciencia. Nuestros más cordiales saludos.

GJ, CC Y LM

1 - El Nitrógeno Líquido

Una experiencia acerca de estados de la materia y cambios de fase.

Durante las demostraciones les hemos mostrado las propiedades de ese líquido tan particular que seguramente ninguno de ustedes esté acostumbrado a ver. Vamos a recordar ahora qué es ese líquido y porqué tiene esas propiedades que nos asombran.

El nitrógeno es uno de los principales componentes del aire. De hecho, el 80% del aire que respiramos es nitrógeno, siendo el otro 20% principalmente oxígeno y alguna pequeña cantidad de otros gases. Como sabemos, el nitrógeno en el aire que respiramos es un GAS. Éste es uno de los tres estados de agregación de la materia: sólido, líquido y gaseoso. El estado gaseoso está definido básicamente por no tener una forma y un volumen fijo propios. En él las moléculas están libres y tienen muy poca fuerza de interacción entre ellas. Hay otros gases con los que cotidianamente convivimos. Uno de ellos es el vapor de agua, que está naturalmente en el aire: cuando el servicio meteorológico nos informa que la humedad ambiente, por ejemplo, es del 60%, nos quiere decir que el contenido de vapor de agua en el aire es del 60% de la máxima cantidad de vapor que puede sostener el aire a esa temperatura. Pero el lugar en el que seguramente más está presente el agua en sus tres estados de agregación es la cocina.



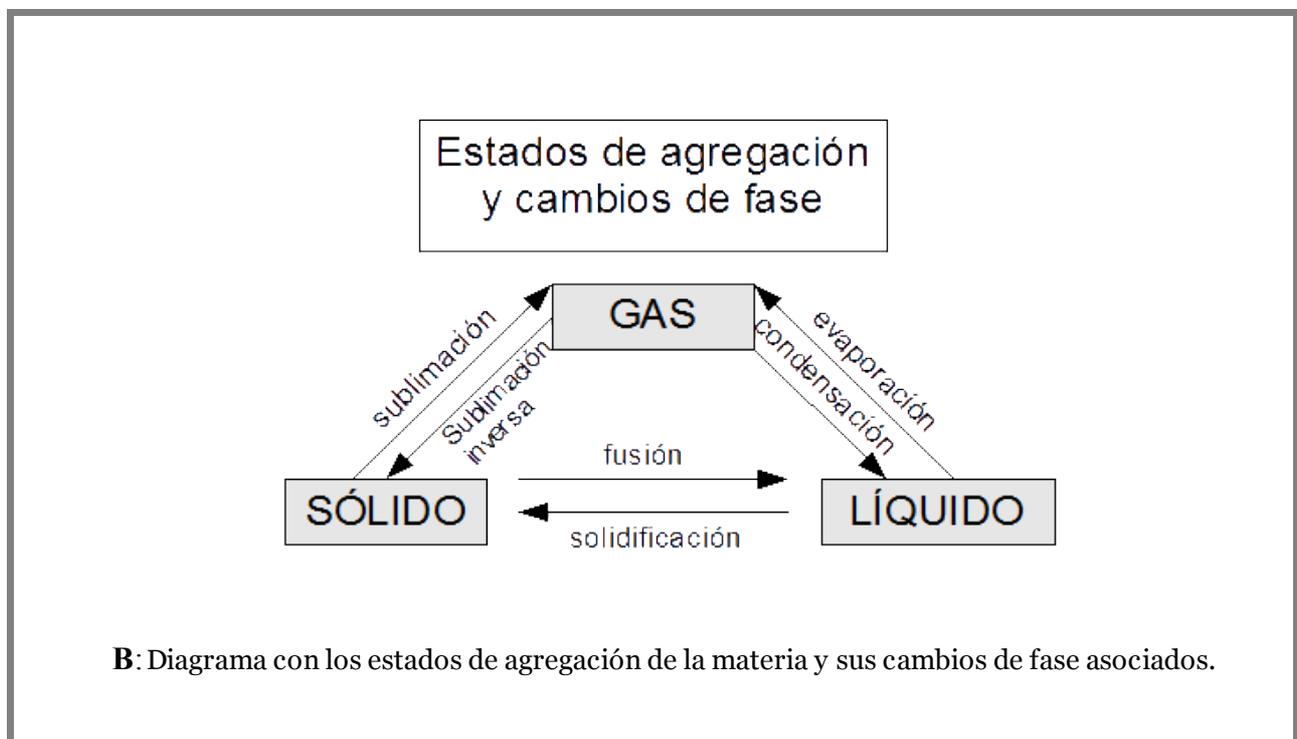
Como ejemplo veamos qué pasa cuando preparamos unos mates: Primero llenamos la pava con agua. Abrimos la canilla y el agua fluye muy naturalmente, saliendo de la canilla, cayendo hacia la pava, salpicando y formando gotitas en la bacha. Y en este comportamiento tan natural y cotidiano encontramos la definición de lo que es un LÍQUIDO: el estado en el cual la materia puede fluir y puede formar gotas (o superficies naturales que lo delimitan). Esta definición lo diferencia de un gas, ya que el gas puede fluir pero no puede formar superficies que lo delimiten. Por esa capacidad de fluir a estos dos estados se los denomina FLUIDOS.

Sigamos con nuestro mate: prendemos la hornalla de gas (el nombre aquí nos sugiere

algo: ¿de qué estará compuesto el gas de las hornallas, también llamado gas natural?), ponemos la pava al fuego y nos ponemos a hacer otra cosa, y por supuesto nos olvidamos del agua y comienza a hervir. ¿Qué es lo que sucede con el agua cuando hierve? Éste es el ejemplo más cotidiano de un cambio de fase (o de estado) de la materia. El agua que está en el estado líquido dentro de la pava cambia de estado lentamente y pasa al estado gaseoso. Este cambio se llama vaporización. La temperatura en la cual ocurre este cambio se llama Punto de Ebullición, y a presión ambiente es de 100°C para el agua. Y si el vapor de agua toca alguna superficie fría comienzan a formarse pequeñas gotitas sobre esa superficie: El agua se está volviendo líquida nuevamente, y a eso se lo llama Condensación.

El agua también puede estar en un tercer estado que se llama SÓLIDO: o aquel estado en el cual las partículas están en posiciones relativamente fijas, con lo cual el material posee una forma definida. El hielo o la nieve que se forman en el Freezer o congelador de la heladera son ejemplos de estados del agua sólida, aunque son diferentes entre sí. Y por supuesto puede haber pasajes entre el estado sólido y el líquido (fusión, cuando el hielo se derrite, o solidificación, cuando el agua se hace hielo) o incluso pasaje desde el estado sólido al gaseoso (sublimación; no sucede en el agua a presión ambiente, pero sí por ejemplo en el hielo seco, que es la forma sólida del dióxido de carbono).

Y ahora la pregunta que debemos contestarnos es: ¿De qué depende que el agua esté en el estado sólido, líquido o gaseoso? Intuitivamente respondemos que de la temperatura: si hace mucho frío (menor que 0°C), el agua está sólida. Para temperaturas intermedias (entre 0°C y 100°C) el agua está líquida. Para temperaturas mayores, el agua estará gaseosa. Algo que debemos mencionar aquí es que también depende de la presión atmosférica, ya que por ejemplo, en un lugar muy elevado (en donde la presión atmosférica es menor) el agua hierve a menos de 100°C.



Volviendo entonces al nitrógeno, porque todo esto empezó con el nitrógeno. Tenemos el aire, que es 80% nitrógeno, y es un gas. Para volverlo líquido tenemos que enfriarlo a una temperatura muy baja. Muuuy baja: 196 grados bajo cero!!! Esto se logra con máquinas especiales que enfrían el aire, lo hacen líquido, y separan el nitrógeno del oxígeno, el cual

vuelven a liberar a la atmósfera. El resultado de este proceso es ese líquido que les hemos mostrado en el aula. El líquido está hirviendo constantemente ya que está expuesto a una cantidad de calor¹ muy grande que viene del entorno (parecido a tener agua adentro de un horno a 300°C). Sin embargo, ¡está hirviendo a 200 grados bajo cero! El nitrógeno que vuelve al estado gaseoso evaporándose en este proceso vuelve a formar parte del aire que respiramos.

A temperaturas tan bajas se utiliza otra escala de temperatura, el Kelvin (se abrevia K), en donde 0°C equivale a 273 K, y el punto de ebullición del nitrógeno es de 77 K. La temperatura más baja que existe, pero es imposible alcanzar en la práctica, son los 273°C bajo cero (0 Kelvin), que es llamado “cero absoluto”. Actualmente se pueden alcanzar temperaturas muy cercanas al cero absoluto en los laboratorios de bajas temperaturas del mundo.

Y así como nos hemos maravillado observando a este líquido ultrafrío, también podemos aprovechar la propiedad de que hierve a tan baja temperatura para enfriar distintos materiales y observar su comportamiento a bajas temperaturas, del mismo modo que se aprovecha el agua para hervir alimentos a 100°C, pero en este caso tenemos que recordar que cuando enfriamos con nitrógeno líquido estamos enfriando a 200 grados bajo cero. Eso es lo que vamos a ver en el próximo capítulo.

Para investigar y profundizar:

- Busca ejemplos de materiales gaseosos, líquidos y sólidos a temperatura ambiente.
- Busca materiales que pasen por los tres estados y las temperaturas características en las que esto sucede.
- ¿Hay materiales que NO existan en alguno de los estados?
- Investigar las distintas escalas termométricas existentes y las relaciones entre ellas.
- ¿Cuál es la más baja temperatura que existe en nuestro universo? ¿Cuál la más alta? Ubicar los lugares en donde se produce. ¿Puede el hombre generar artificialmente dichas temperaturas?
- ¿Qué es el “cero absoluto”? ¿Cuán cerca está de alcanzarlo?
- La tapa de una olla a presión cierra herméticamente e impide que el vapor escape hasta alcanzar una cierta presión superior a la presión normal del aire. A medida que el vapor se acumula dentro de la olla herméticamente cerrada, la presión que se ejerce sobre la superficie del líquido aumenta. ¿Por qué crees que los alimentos se cocen más aprisa? ¿Qué sucede con el punto de ebullición?

Actividades para el laboratorio:

- Tomar como material de estudio el agua, que es fácilmente disponible, y estudiar sus cambios de fase y temperaturas a las que se produce (¿varían con la presión atmosférica?). Si se dispone de un recipiente de tefalón y un calentador eléctrico se puede calcular el calor (energía eléctrica) necesario para derretir cierta masa de hielo en equilibrio térmico con agua (calor latente de fusión), o para elevar la temperatura del agua líquida (capacidad calorífica).

Bibliografía y enlaces útiles:

http://www.portalplanetasedna.com.ar/cero_absoluto.htm

http://es.wikipedia.org/wiki/Cambio_de_estado

¹ No confundir Calor con Temperatura. Calor es la energía que se le entrega a un cuerpo para cambiar su temperatura.

http://www.fisicanet.com.ar/quimica/materia/ap01_estados_de_agregacion.php

Libros y revistas sugeridos:

Física II, Editorial Santillana.

Revista “Muy Interesante”, N° 279 (Enero de 2009): “*Hacia el frío absoluto*”.

2 - Arrugando globos

Y de cómo observar las propiedades de los gases a bajas temperaturas.

En este capítulo nos centraremos en la observación de las propiedades de los gases a diferentes temperaturas. Para un gas existen tres propiedades básicas que definen su comportamiento: su presión, su volumen y su temperatura. Mientras el volumen nos indica cuánto espacio ocupa el gas, la presión es una medida de la fuerza por unidad de área que el gas ejerce sobre las paredes del recipiente que lo contiene. En nuestro caso, hemos utilizado globos como recipiente, y la presión del gas será la fuerza que éste le hace a las paredes del globo. Una vez que hemos inflado el globo, éste se encuentra en equilibrio con el ambiente, por lo tanto su presión será la misma que la presión ambiente. Como esta presión no cambia durante la demostración, podemos considerar que la presión del gas se mantuvo constante a lo largo de la demostración. Lo que sí podemos cambiar es la temperatura del gas, sumergiéndolo en nitrógeno líquido, y al hacer esto también cambiaremos su volumen.

Hay una ley, que se la conoce como *Ley de los gases ideales*, que relaciona la presión, el volumen y la temperatura de un gas, mediante la relación

$$\frac{PV}{T} = \text{constante} \quad (1)$$

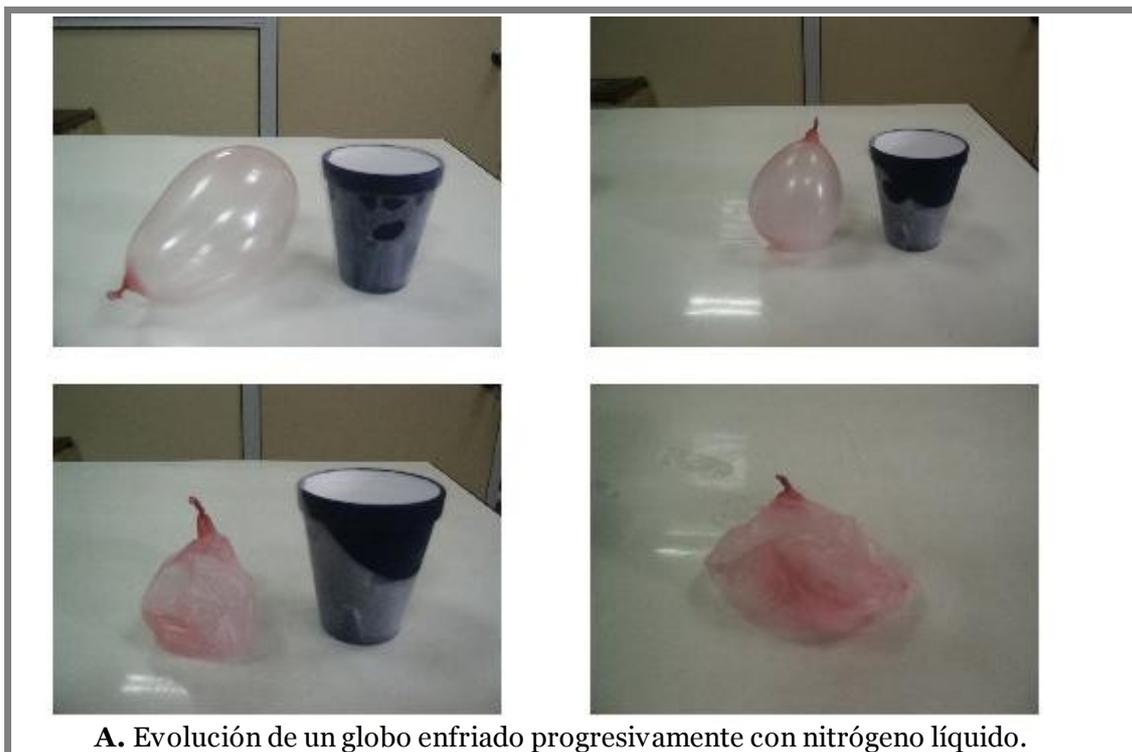
en donde P es la presión, V el volumen y T la temperatura del gas en cuestión. Si consideramos que en nuestro experimento hemos mantenido la presión constante, la relación se puede reducir a

$$V = \text{constante} \cdot T \quad (2)$$

(en este caso la constante es diferente que en la fórmula 1). Esto significa que al *bajar* la temperatura, el volumen del globo se *reducirá*, y viceversa. Esto es precisamente lo que hemos demostrado enfriando los globos, en particular el globo que contenía Helio, y como la temperatura a la cual los enfriamos es muy baja, el volumen del mismo se reduce apreciablemente, siguiendo la ley expresada en (2).

Pero cuando enfriamos globos que contienen *aire* pasa otra cosa más: lo estamos enfriando hasta la temperatura en donde éste se hace líquido (y esto nos refiere al capítulo anterior). Y en este caso, al haber un cambio de fase (condensación del aire dentro del globo) el volumen del globo colapsa casi por completo, ya que el volumen correspondiente del gas es alrededor de 600 veces el correspondiente al líquido. Esquematizamos esta demostración en la figura A. Cuando calentamos el globo nuevamente, llevándolo a la temperatura ambiente, el aire dentro del globo se vuelve a gasificar, y el volumen se recupera totalmente al original.

En el próximo capítulo estudiaremos las propiedades de los materiales sólidos a bajas temperaturas, como lo hemos observado en las demostraciones experimentales.

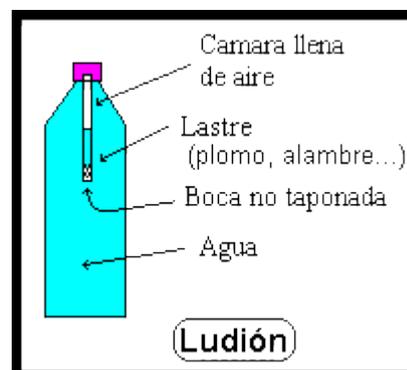


☐ ✎ Para investigar y profundizar:

- ¿Cómo funcionan los globos aerostáticos? ¿Por qué los globos de helio vuelan?
- Investigue acerca de los gases NO ideales, es decir, aquellos que no obedecen la ley de la ecuación (2). ¿En qué condiciones el aire puede ser considerado gas ideal y en qué condiciones no?

✎ ✂ Actividades para el laboratorio:

- Con un poco de maña se puede fabricar un émbolo para el estudio de la variación de volumen con temperatura del aire. Un elemento muy útil si no se logra fabricar un émbolo que sea estanco (que no pierda aire), es una jeringa de vidrio. Poseen muy poco rozamiento y son ideales para este tipo de experiencias. Si se la conecta a un tubo de ensayo se puede variar la temperatura con un secador de pelo o una llama suave sobre el tubo de ensayo y medir los cambios de volumen en la jeringa.
- Con el “ludión” que es mostrado en la figura podemos comprobar lo difícil que es comprimir un líquido y, al contrario, lo fácil que resulta en el caso de un gas. Llená totalmente con agua una botella grande de plástico flexible. Llená parcialmente con agua un tubo de ensayo (o la carcasa de una birrome transparente sin agujeros) de tal manera que apenas flote cuando lo colocás tapado con el dedo en invertido en la botella grande (tal vez tengas que tratar varias veces para conseguirlo). Una vez que el tubo de ensayo flote correctamente, apretá bien la tapa de la botella grande de modo que quede herméticamente cerrada. Cuando oprimas los costados de la botella grande el tubo de ensayo se hunde; cuando soltás la botella, el tubo vuelve a subir. Experimentá apretando la botella de distintas maneras para obtener resultados diferentes.



¿Podés explicar el comportamiento del tubo de ensayo? ¡Investigá sobre los principios de Pascal y de Arquímedes!

  **Bibliografía y enlaces útiles:**

En enciclopedias virtuales:

http://es.wikipedia.org/wiki/Ley_de_los_gases_ideales

Guías experimentales.

<http://www.fisicarecreativa.com/guias/procesos.pdf>

Imagen del Ludió extraída de

www.ciencianet.com

Textos:

Física II, Editorial Santillana.

Física 2, Maiztegui-Sábato, Editorial Kapelusz.

Calor y Termodinámica, Zemansky.

3 - Experimentos en frío

Investigando las propiedades de los sólidos a bajas temperaturas.

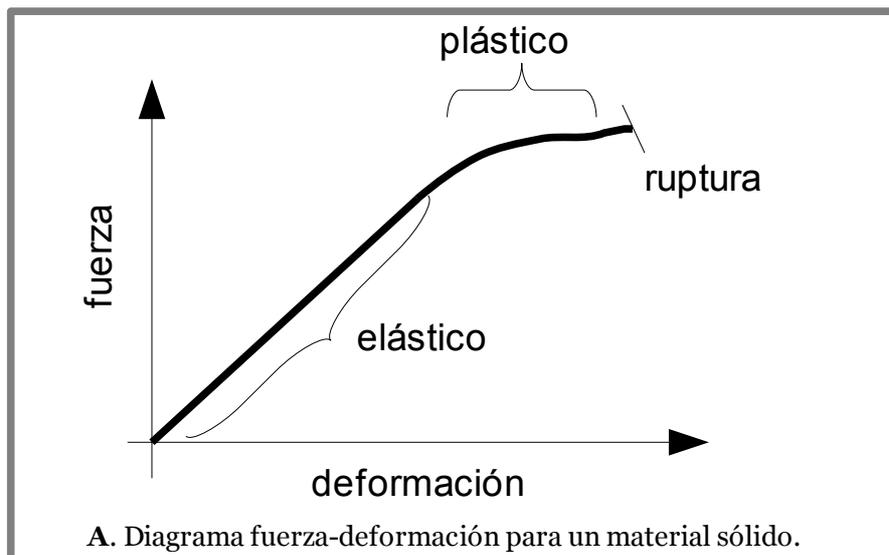
En el capítulo anterior hemos profundizado sobre las propiedades físicas de los gases a bajas temperaturas, y hemos visto cómo el volumen de un globo sumergido en nitrógeno líquido se reducía. Si recuerdan las demostraciones que hemos realizado verán que también experimentamos con varios materiales sólidos, ya sea orgánicos (flores o frutos), como metales o ciertas gomas.

Aquí vamos a dar una pequeña introducción a las propiedades de estos sólidos a bajas temperaturas. En particular nos va a interesar lo que se conoce como *elasticidad* de un cuerpo o sustancia, y es la propiedad que caracteriza la respuesta del sólido ante una deformación mecánica. Es lo que nos dice cuánto se va a estirar una barrita de algún material cuando tiramos de él. Existe una magnitud que se define de esa manera y se llama *módulo de elasticidad* (o *módulo de Young*) y es una medida de qué fuerza hay que hacerle a una barrita de una dada sección para estirarla en una dada longitud. En particular, se lo suele denominar también *constante elástica* de un material. De esta manera, un módulo de elasticidad grande nos está indicando que hay que hacer mucha fuerza para estirar el material, o por lo menos más fuerza que para estirar una barrita similar de otro con menor módulo. Existen otros módulos de elasticidad que nos indican cómo se comporta el material ante una fuerza que tiende a doblarlos, a comprimirlos, etc., pero no hablaremos de ellos aquí.

Cualquiera que haya estirado una bandita elástica lo suficiente habrá comprobado que si la estira poquito, al soltarla la bandita vuelve a su longitud inicial. A esto se lo llama comportamiento elástico. Y la relación que obedece la bandita en este régimen es muy simple:

$$F = k \cdot L \quad (1)$$

dicho en palabras, la fuerza F aplicada a la bandita es proporcional al estiramiento L (diferencia entre la longitud sin fuerza y con fuerza), y la constante que los relaciona es la constante elástica k . Si observamos la figura A, estaríamos ubicados en la zona de comportamiento elástico o lineal.



¿Pero qué pasa si seguimos estirando? Todos comprobamos alguna vez que al estirar mucho una bandita, ésta se deforma permanentemente, o sea que cuando la soltamos ya no vuelve a la misma longitud inicial sino que queda más estirada. A ésto se lo llama comportamiento plástico, en donde ya no se cumple la relación (1) y el material queda deformado permanentemente (existe lo que se conoce como histéresis mecánica). Esto corresponde a la zona de comportamiento plástico de la figura.

Más allá de este comportamiento, si seguimos estirando más y más nuestra bandita, veremos que en algún momento se rompe, y ésto es lo que se conoce como límite de ruptura, marcado con una línea final en la figura. Todos los materiales poseen este límite de ruptura, que dependerá de su estructura interna.

Todos los materiales presentan cambios en sus constantes elásticas a medida que se cambia su temperatura. Algunos cambios son leves, como por ejemplo los que se presentan en los metales cuando se los enfría. Ya que la constante elástica está directamente relacionada con la frecuencia natural de vibración de un material (la que se oye cuando por ejemplo se percute una barra metálica), ésta cambiará a cambiar la temperatura del metal. La constante elástica en general aumenta al bajar la temperatura (volviendo al material más rígido), por lo tanto la frecuencia de vibración será mayor a bajas temperaturas (un tono musicalmente más alto). Esto mismo es lo que hemos demostrado en los experimentos, percutiendo dos barras metálicas iguales pero a distintas temperaturas. Como el módulo de elasticidad varía muy poco, para que haya un cambio notable en la frecuencia de vibración tenemos que variar mucho la temperatura de una de ellas, y éso lo logramos con nitrógeno líquido. Si al metal, al contrario, lo calentamos lo suficiente, lo podemos fundir. Pero ésto fue el tema del capítulo anterior así que lo dejaremos ahí.



Existen otros materiales sólidos cuyo estado a temperatura ambiente posee una constante elástica muy baja (son muy “blandos”). Estos materiales están formados por unas moléculas muy grandes entrelazadas y se los denomina en la jerga “polímeros”. El ejemplo más conocido y antiguo es el caucho natural o látex, que se obtiene de un árbol

sudamericano, y también los hay fabricados por el hombre (habitualmente llamados plásticos). Muchos de estos materiales se encuentran a temperatura ambiente en un estado denominado “gomoso” (con las características de la goma), caracterizado por una baja constante elástica, pero al bajar la temperatura experimentan un cambio de fase hacia un estado de muy alta constante elástica, denominado “vítreo” (por ser un estado similar al vidrio). Esta transición no es como las descritas en el capítulo I, ya que es una transición entre dos estados sólidos diferentes. También se produce en los polímeros que son vítreos a temperatura ambiente (como los poliuretanos o polipropilenos) y pasan al estado gomoso a una temperatura mayor. Pudimos comprobar en la demostración este tipo de transiciones con materiales de látex, viendo cómo pasaban al estado vítreo al ser enfriados lo suficiente, y luego volviendo a su estado gomoso al volver a temperatura ambiente. En la figura B podemos observar este fenómeno en una manguera de látex enfriada en nitrógeno líquido, la cual se cuelga de un pie y al calentarse pasa del estado vítreo (o de alta constante elástica) al estado gomoso (de baja constante elástica).

Otra característica que distingue a los metales y otros materiales sólidos de los polímeros es el cambio en su forma ante una variación de temperatura. Una barrita metálica se dilatará al aumentar la temperatura (se vuelve más larga). Una bandita elástica tiene el comportamiento inverso, se contrae al aumentar la temperatura. Esto se debe a la estructura entrelazada de sus moléculas las que, al calentarse, se enrollan más sobre sí mismas y contraen la bandita.

Con los materiales orgánicos sucede otra cosa que hemos visto en las demostraciones con flores y frutos enfriadas en nitrógeno líquido, y es muy interesante. Estos materiales poseen agua en su estructura. Cuando sometemos estos materiales a bajas temperaturas, el agua presente en las células se congela y el material se vuelve quebradizo, tanto más quebradizo cuanto más baja es la temperatura a la que se lo somete. Esto es así ya que con una baja fuerza aplicada se llega al estado de ruptura de la figura A. Así, podemos romper las flores con la mano como si fuera vidrio, cosa que sorprende bastante a los espectadores. Al volver a temperatura ambiente, en general, ya el material orgánico no se recompone (aunque en general no pierde su aspecto salvo algunas excepciones), ya que al congelarse el agua en el interior de las células, las paredes de éstas se rompen (al igual que puede romperse una botella dejada en el freezer más de la cuenta), dado que el hielo se expande al enfriarse (por otra parte, al revés de lo que sucede con los metales).



B: Flor supercongelada rompiéndose, tomada con una cámara rápida.

☐ ✎ Para investigar y profundizar:

- Busque distintos ejemplos de estados de la materia sólida de una misma sustancia pero diferentes entre sí (ejemplo, hielo y nieve). Veas las condiciones en las que se producen los diferentes estados, y las transiciones entre ellos.
- Para el caso de los materiales del tipo vidrio y goma, enuncie sus características. Profundice sobre la estructura molecular de dichos materiales.

 ✂ Actividades para el laboratorio:

- Investigue los distintos estados de elasticidad de una bandita elástica de goma. Para ello puede ir cargándola con diferentes pesos y determinar los límites de elasticidad y plasticidad, límite de rotura y constantes elásticas. Preste especial atención a la histéresis mecánica si se la estira hasta el límite plástico.
- Investigue la variación de la constante elástica de la bandita de goma con la temperatura. Tenga especial atención en el diseño del experimento.
- La próxima vez que tengas dificultad para destapar un frasco, deja que la expansión térmica te ayude a hacerlo. Calienta la tapa metálica colocándola bajo un chorro de agua caliente o colocándola por un momento sobre una estufa caliente. La tapa de metal se expandirá más que el vidrio y ¡listo! Un pequeño giro y el frasco se abrirá. ¿Podés explicar cómo funciona esto?

  Bibliografía y enlaces útiles:

Textos:

Física I y II, Editorial Santillana.

Física 1 y 2, Maiztegui-Sábato, Editorial Kapelusz.

Para medir constantes elásticas:

<http://www.fisicarecreativa.com/guias/hooke.pdf>

En enciclopedias virtuales:

http://es.wikipedia.org/wiki/M%C3%B3dulo_de_elasticidad

4 – Motores térmicos

Una introducción, el primer motor térmico, y un juguete muy antiguo a vapor.

En los tres capítulos siguientes vamos a dedicarnos a estudiar una parte de la termodinámica que se dedica al estudio de la transformación de la energía térmica (calor) en trabajo mecánico. En las demostraciones hemos visto varias máquinas que realizan esta función, a las cuales se las denomina Máquinas o Motores térmicos. Hemos visto la primera máquina térmica llamada máquina de Hero, que funciona a vapor. También les mostramos un juguete muy antiguo, una lanchita que funciona con una velita, impulsándose con el vapor generado cuando la velita calienta el agua dentro de una pequeña caldera. En este capítulo les presentaremos una introducción al tema de los motores térmicos, junto con la explicación de los dos dispositivos que mencionamos, mientras que en los dos capítulos que le siguen vamos a hablar de dos máquinas muy especiales y atractivas: El pajarillo bebedor y la máquina de Stirling.

Motores térmicos. Transformación de trabajo en calor, y viceversa.

Si se frota entre sí dos piedras sumergidas en agua, éstas aumentarán su temperatura por el rozamiento hasta alcanzar el equilibrio térmico con el agua, la cual aumenta también su temperatura. Ésta es una forma de transformación de energía, estamos transformando la energía mecánica (frotamiento de la piedra, también lo llamamos trabajo mecánico, o simplemente trabajo) en energía térmica (calor), que es la que causa que el agua aumente su temperatura. Por la conservación de la energía, el trabajo (lo denominamos W) es igual al calor (que denominamos Q). Si llamamos *rendimiento* a la cantidad de calor obtenida en proporción al trabajo mecánico realizado, resulta que la transformación de trabajo en calor se realiza con un rendimiento del 100%, y además esta transformación se puede realizar indefinidamente. El proceso inverso, es decir, la transformación indefinida de calor en trabajo es realizada por los motores térmicos. Recordemos que llamamos trabajo a la energía disponible, por ejemplo, para mover una pieza o hacer rodar una rueda.

Ahora nos ponemos un poquito más teóricos. Supongamos que tenemos un motor térmico que funciona cíclicamente, y que en cada ciclo se absorbe una cantidad Q_1 de calor y se realiza un trabajo neto W . El rendimiento térmico η del motor se define como

$$\eta = \frac{W}{Q_1} \quad (1)$$

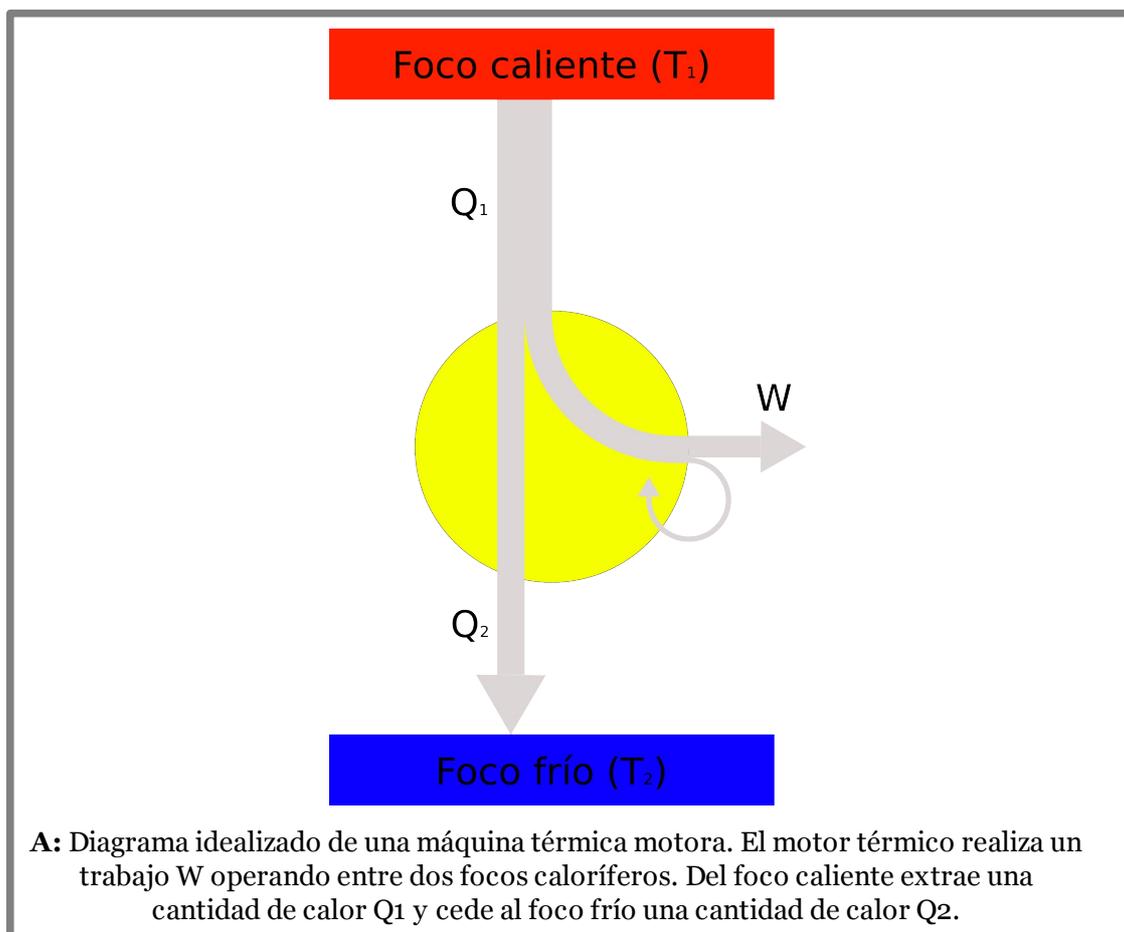
El rendimiento óptimo ocurriría en el caso en que todo el calor Q_1 sea transformado en el trabajo W , sin embargo, el segundo principio de la termodinámica indica que en la práctica esto no es posible y que cierta cantidad Q_2 de calor debe ser cedido por el sistema, con lo cual $\eta < 1$.

La transformación de calor en trabajo se realiza de ordinario en la práctica por dos tipos generales de motores, el motor de combustión interna (en un automóvil, por ejemplo) y la máquina de vapor (grandes turbinas generando electricidad, por ejemplo). En ambos casos, un gas o mezcla de gases contenidos en un cilindro experimenta un ciclo, obligando a un pistón a comunicar a un eje un movimiento de rotación, venciendo una fuerza. En ambos motores es necesario que el gas experimente en determinado instante del ciclo elevaciones de temperatura y de presión. En la máquina de vapor esto tiene lugar en un horno exterior, que por conducción y radiación de calor hace que el agua se caliente y

pase a vapor a temperatura elevada. Por el contrario, la temperatura y presión elevadas conseguidas en los motores de combustión interna se producen por una reacción química entre un combustible y el aire, y tiene lugar en el propio cilindro.

Motor térmico idealizado.

Si el rendimiento de un motor térmico nunca puede ser del 100%, entonces la pregunta natural que surge es: ¿Cuál es el máximo rendimiento con que puede funcionar una máquina térmica? Para investigar esta cuestión, imaginemos el esquema idealizado mostrado en la figura A de un motor térmico en que el calor Q_1 es absorbido de un ambiente muy grande a una temperatura constante T_1 (foco caliente) y el calor Q_2 es cedido a otro ambiente a temperatura T_2 (foco frío). No es necesario conocer la naturaleza exacta de, por ejemplo, el ciclo de una máquina de vapor para comprender que, durante el ciclo, se calienta agua hasta la temperatura de ebullición y se vaporiza, y que para ello debe haber un flujo calorífico desde un foco exterior caliente. Además, es evidente que, después de la expansión, el vapor ha de condensarse a una temperatura inferior, lo que supone un flujo calorífico hacia un foco exterior frío. De ordinario, sólo hay dos focos, uno a temperatura más elevada que el otro; por ejemplo, la caldera y el condensador de una máquina de vapor.



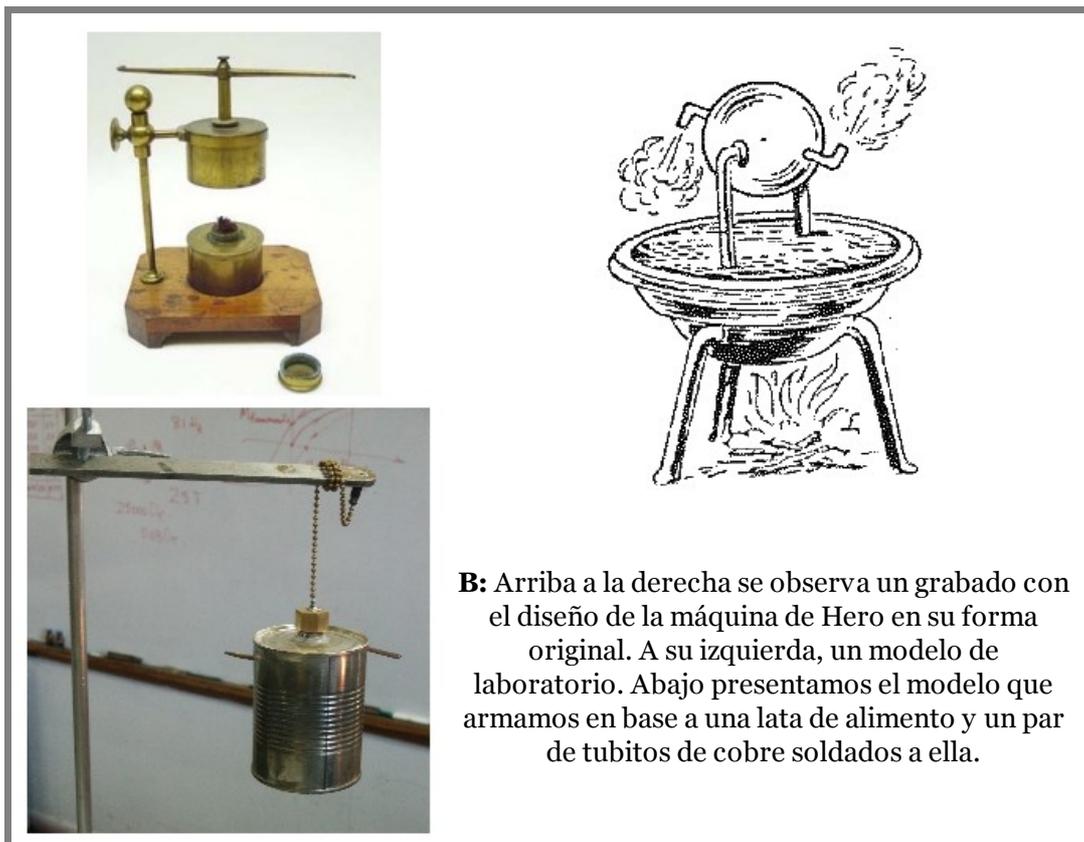
Se sabe que un motor térmico como el representado en la figura A puede operar con un rendimiento máximo η_r dado por

$$\eta_r = 1 - \frac{T_2}{T_1} \quad (2)$$

Esto quiere decir que el rendimiento de este motor idealizado será tanto más grande cuanto mayor sea la diferencia de temperatura entre las fuentes con que opera. También se establece un límite a los motores térmicos reales, ya que su rendimiento nunca puede superar el dado por la fórmula (2).

La máquina de Hero.

Fue inventada por Hero de Alejandría allá por el año 60 de nuestra era, y se cree que es la primera máquina térmica conocida. La máquina consiste en un recipiente que contiene agua, el cual es calentado hasta el punto de ebullición del agua. Por la evaporación del agua, y del hecho que el vapor de agua ocupa un volumen mucho mayor que el líquido, la presión dentro del recipiente aumenta muy por encima de la presión ambiente. La presión se relaja por unos tubitos de diámetro pequeño que se colocan en extremos opuestos y en dirección tangencial al recipiente, de manera que al liberarse el vapor con fuerza por estos tubos, se genere la rotación del recipiente. La fuente caliente de esta máquina es el elemento que calienta el agua (fuego o brasas). La fuente fría será el ambiente al cual es liberado el vapor al salir por los tubos. El giro se produce por conservación del impulso (pueden investigar este tema en los libros sugeridos en la bibliografía). En la figura **B** se aprecia un grabado con el modelo primigenio de máquina, a su izquierda un modelo de laboratorio, y debajo el modelo casero que hemos fabricado para esta muestra.

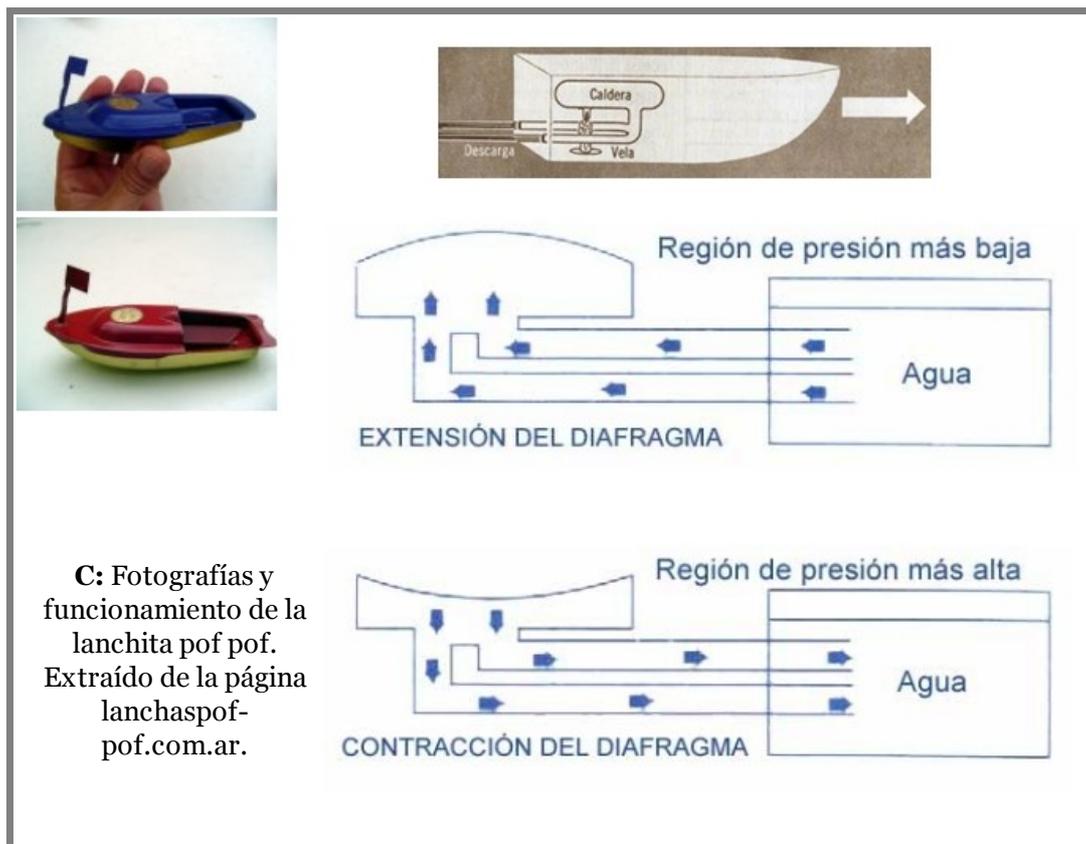


B: Arriba a la derecha se observa un grabado con el diseño de la máquina de Hero en su forma original. A su izquierda, un modelo de laboratorio. Abajo presentamos el modelo que armamos en base a una lata de alimento y un par de tubitos de cobre soldados a ella.

La lanchita Pof Pof.

También una máquina de vapor, fue un juguete muy utilizado hacia mitad del siglo XX por los niños. Quizás los padres de algunos de ustedes, o sus profesores, se acuerden de

este atractivo juguete. Como el dispositivo anterior, funciona calentando el agua que se coloca en una pequeña calderita gracias a una vela que se coloca debajo. La vela actúa como fuente caliente. Pero a diferencia de la máquina de Hero, la lanchita no posee piezas móviles. El movimiento lo logra por el impulso del vapor del agua al expandirse y salir por los tubos hacia el agua que se encuentra en el exterior (fuente fría). Cuando el agua hierve, aumenta la presión y el vapor sale por los tubos, impulsando la lancha hacia adelante. Al vaciarse repentinamente, el depósito se enfría y la presión baja, absorbiendo nuevamente líquido hacia dentro de la caldera (ver figura C). En la figura también se observa el comportamiento del diafragma con la presión, cuya única finalidad es producir el clásico ruido “pof pof” de este juguete (en realidad funcionaría perfectamente sin este diafragma).



C: Fotografías y funcionamiento de la lanchita pof pof. Extraído de la página lanchaspof-pof.com.ar.

☐ ✎ Para investigar y profundizar:

- Determine las variables que realizan un ciclo en estas máquinas térmicas.
- ¿Qué pasa con el impulso del agua que vuelve a entrar en la lanchita? ¿No debería moverla hacia atrás, haciendo que la lancha no se mueva?
- Profundice sobre el funcionamiento del motor de combustión interna y de la máquina de vapor.
- Imaginate que deseás enfriar una cocina y abrís la puerta del refrigerador, y cerrás la puerta y las ventanas de la cocina. ¿Qué le ocurrirá a la temperatura del cuarto? ¿Por qué?

✎ ✂ Actividades para el laboratorio:

- Se puede construir una máquina de Hero, como la de la figura B, con una lata de

alimentos y dos tubitos de cobre soldados en su borde (con un poco de ayuda de alguien que sepa soldar con estaño).

- Si consigue armarse una lanchita, o consigue una hecha, puede pensarse en algún sistema que aproveche su movimiento para realizar trabajo mecánico (por ejemplo, mover o levantar un peso).

Bibliografía y enlaces útiles:

Para conservación del impulso:

Física 1, Maiztegui-Sábato, Editorial Kapelusz.

Libros de termodinámica más avanzados:

- Mark W. Zemansky, “Calor y termodinámica”, 4.a ed., Aguilar, 1961.
- Julio Gratton, “Termodinámica e introducción a la mecánica estadística”

En este link se pueden conseguir las lanchitas pof pof. De él hemos extraído las imágenes de la figura **C**:

<http://www.lanchaspof-pof.com.ar/>

Links sobre la máquina de Hero (algunos en Inglés). Fuentes de imágenes de la figura **B**. Instrucciones para construir máquina de Hero con una lata y lanchitas pof pof:

<http://scitoys.com/scitoys/scitoys/thermo/thermo.html>

http://physics.kenyon.edu/EarlyApparatus/Thermodynamics/Heros_Engine/Heros_Engine.html

<http://blogs.eldiariomontanes.es/scientia-mater/2009/6/3/fisica-juguetes-y-dispositivos-sencillos-molinete-termico>

5 - El pajarito bebedor de Homero Simpson

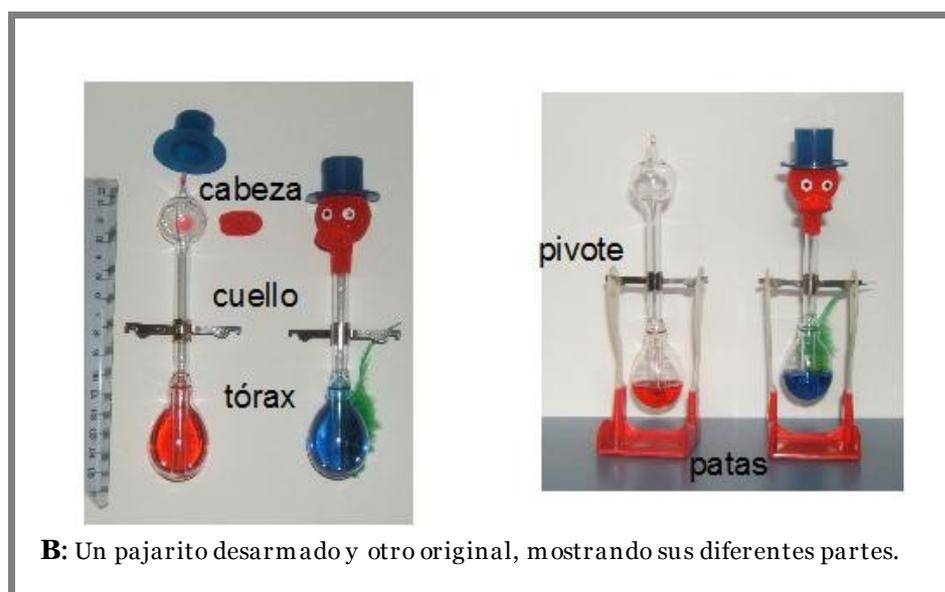
Una increíble máquina térmica.

En este capítulo hablaremos muy brevemente de ese juguetito maravillosos que en algún momento aparece en la afamada serie televisiva “*Los Simpsons*”, realizando el trabajo que Homero debía hacer desde su casa apretando la tecla “Y” de la computadora. Y ya les habremos adelantado que este dispositivo no es mágico (no funciona *solo*, sino que aprovecha una energía presente en el ambiente para moverse, en otras palabras, no es un “móvil perpetuo”). Ya hemos introducido el tema de los motores térmicos en el capítulo anterior, por lo tanto ahora estamos en condiciones de explicar brevemente su funcionamiento.



A: El pajarillo bebedor, según se observó en la serie “*Los Simpsons*”.

Empezaremos por describir el objeto. El pajarillo consta de dos recipientes esféricos de vidrio con una entrada, uno hace las veces de cabeza, y el otro es el cuerpo. Un tubo de vidrio (cuello) une las dos partes, con la diferencia que en la cabeza el tubo termina al comienzo de la esfera, mientras que en el cuerpo el tubo se inserta hasta casi tocar la parte inferior de la esfera (ver figura B). La cabeza está recubierta de un material capaz de

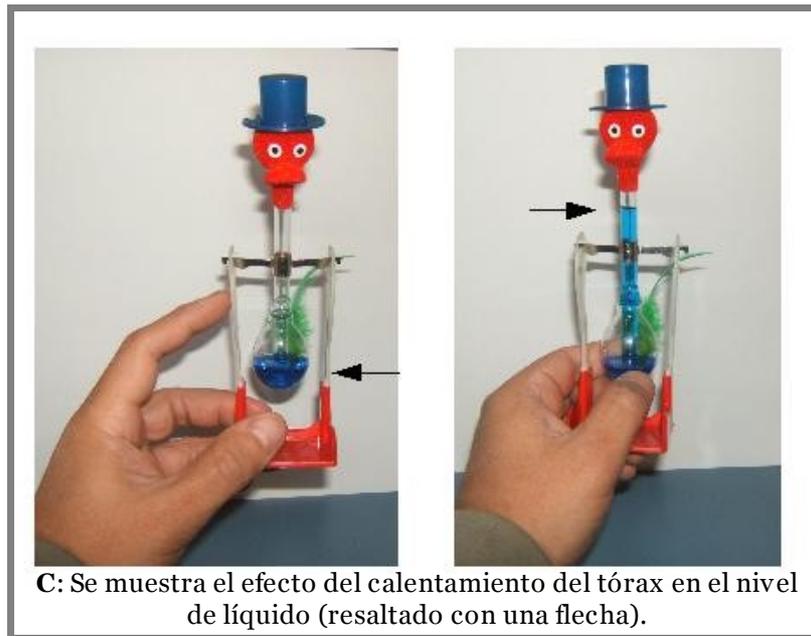


B: Un pajarito desarmado y otro original, mostrando sus diferentes partes.

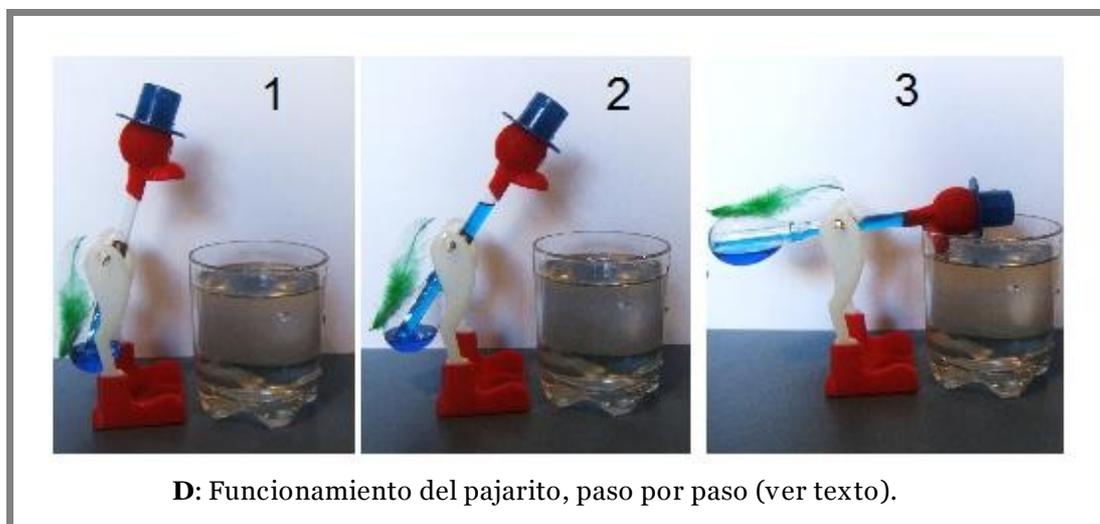
absorber agua, y está adornada con un sombrero y un pico. En el cuello se fija un soporte metálico, que a su vez está apoyado sobre unas patas de plástico, lo que permite que el pájaro pivotee sobre dichas patitas. El cuerpo del animalito contiene un líquido (rojo o azul), que es un compuesto muy volátil. Al llenarle el cuerpo con este líquido, la empresa fabricante le ha sacado el aire previamente, con lo cual en el interior del pájaro sólo hay

líquido y el *vapor* que ese líquido desprende.

En un principio, el líquido se ubica en el tórax, pero su nivel es tal que obstruye el tubo de vidrio, con lo cual el vapor del cuerpo no se conecta con el vapor que está en la cabeza. Si el cuerpo y la cabeza están a la misma temperatura, entonces no sucede nada. PERO si por alguna razón se produce una diferencia de temperatura que haga que la cabeza quede más fría que el cuerpo (por ejemplo, tocamos con nuestras manos la cola del animal), entonces se produce algo interesante, ya que el gas del cuerpo estará a una temperatura mayor que el gas de la cabeza. Si recuerdan del capítulo 1, un aumento de la temperatura implica un aumento de la presión, con lo cual la presión del gas del cuerpo será mayor que la de la cabeza, y ésto obliga al líquido a subir. En la imagen **C** se muestra este efecto.



El funcionamiento requiere, entonces, que haya algún mecanismo que produzca una diferencia de temperatura entre cola y cabeza. En el modelo original, ésto se produce al mojar la cabeza con agua, debido a la evaporación de ésta. Como para lograr la evaporación requiere transferir calor hacia el agua, como resultado se obtiene el enfriamiento de la cabeza (en una magnitud mínima, se calcula sólo medio grado Celsius). Esta diferencia alcanza para producir el ciclo mostrado en la figura **D**.



Debido a la diferencia de temperatura, el líquido comienza a ascender por diferencia de presión. Al llegar a la cabeza, se desbalancea el pájaro y éste pivotea en las patas y sumerge el pico en el vaso con agua. Al balancearse hacia adelante, se abre la conexión entre cabeza y cuello y el líquido vuelve hacia la cola por gravedad, lo cual hace que el pájaro se levante y el ciclo comience de nuevo.

Para investigar y profundizar:

- En el modelo original se utiliza agua como fuente de energía para producir la diferencia de temperatura que haga funcionar el dispositivo. ¿Qué otras fuentes de energía podrían utilizarse para hacerlo funcionar?
- En la muestra les presentamos un modelo desarmado y que está pintado de negro en su cola. ¿De dónde extrae la energía necesaria para funcionar?
- ¿Qué variables físicas realizan un ciclo en esta máquina (variables que cambian durante cada ciclo pero son iguales antes y después de realizarlo)?
- En el pajarito bebedor vimos que la diferencia de temperatura se lograba a través de la vaporización del agua. En relación con eso, tratá de explicar a qué se debe que puedas determinar la dirección del viento si humedecés tu dedo y lo sostenés en el aire.
- En un día de campo, ¿por qué es mejor envolver una botella en un trapo húmedo para enfriarla que colocarla en un cubo de agua fría?
- Hace dos siglos Benjamín Franklin hizo la siguiente experiencia: extendió sobre la nieve un trozo de tela clara y otro de tela oscura. Entonces observó la diferencia en la rapidez de fusión de la nieve bajo las telas. ¿Qué creés que pasó?

✂ Actividades para el laboratorio:

- Si consiguen algunos de estos juguetes (ver Bibliografía), pueden sacarle a uno de ellos el pico y el sombrero (junto con la cobertura roja) CON MUCHO CUIDADO, y utilizando para ello agua caliente como para el mate. Se le sumerge la cabeza por un ratito y el pegamento afloja sólo. Luego se le puede pintar la parte inferior con pintura negra en aerosol para tener un “pájaro a luz”.
- Otra variante experimental interesante es tratar de inventar un sistema para que el movimiento del pájaro resulte en trabajo utilizable, por ejemplo, para mover o levantar un peso. De esta manera se puede medir el trabajo que genera la máquina.
- Se puede investigar sobre el efecto de la humedad relativa en su funcionamiento, así como hacerlo funcionar con alcohol en vez de agua (lo que acelera el movimiento ya que se evapora más rápido).

Bibliografía y enlaces útiles:

Les podemos recomendar algunas páginas en Internet sobre cómo funcionan estos dispositivos (una de ellas está en inglés). A su vez pueden encontrar en cada una otros links. Para más información pueden buscar en internet por “Dippy bird” o “Drinking bird”. Los pajaritos se pueden encontrar en venta en Internet buscando “Pajarito bebedor” o “Pajarillo bebedor” (por ejemplo, en www.mercadolibre.com.ar).

<http://www.howstuffworks.com/question608.htm>

<http://www.profisica.cl/comofuncionan/como.php?id=18>

<http://www.disfrutalaciencia.es/articulos/pajarobebedor2.pdf>

6 – El Motor de Stirling

La máquina perfecta.

En este capítulo estudiaremos otra de las máquinas que les hemos presentado en la muestra: el motor de Stirling. Es una de las máquinas que más eficientemente convierte la energía en trabajo utilizable, casi tanto como la más eficiente de las máquinas ideales (máquina de Carnot).

Introducción.

Un motor Stirling es un dispositivo que, como la máquina de vapor y el motor de combustión interna, convierte la energía calorífica en energía mecánica. Sin embargo, la principal diferencia es que el motor Stirling no quema combustible, sino que el calor puede proceder prácticamente de cualquier fuente. El “Motor de ciclo de Stirling” fue inventado en 1812 por el clérigo escocés Robert Stirling como un intento de sustitución de las peligrosas máquinas de vapor de la época. Perdió su interés tras el desarrollo del motor de combustión interna y ha retornado su interés en los últimos años por varias características muy favorables que posee. Es esencialmente un motor de combustión externa que funciona mediante un ciclo cerrado por compresión y expansión de una gas en cilindros que se calienta y se enfría sucesivamente. Esto hace mover a los pistones cíclicamente con el fin de accionar un eje.

Importancia.

El motor Stirling tiene el potencial de alcanzar el límite máximo de rendimiento teórico dado por la fórmula 2 del capítulo 5. Este motor intercambia el calor con el exterior, por lo tanto es adaptable a una gran gama de fuentes de calor para su operación. Se han construido motores Stirling que usan como fuente de calor la energía nuclear, energía solar, combustibles fósiles, calor de desechos de procesos, etc. Al ser de combustión externa, el proceso de combustión se puede controlar muy bien, por lo cual se reducen las emisiones.

Actualmente se está trabajando en la generación de motores Stirling que proporcionen luz y calor a muchas viviendas. Los sistemas *Dish/Stirling* son una de las tres principales tecnologías solares termoelectricas para producir electricidad que pueden tener una gran importancia para cubrir las demandas de electricidad limpia en el siglo XXI. Consisten de un espejo parabólico que concentra la energía solar en su zona focal. Un motor Stirling convierte este calor en energía mecánica, que es a su vez transformada en energía eléctrica por un generador acoplado directamente al eje del motor.



A. Prototipos Dish/Stirling - Plataforma solar de Almería – España.

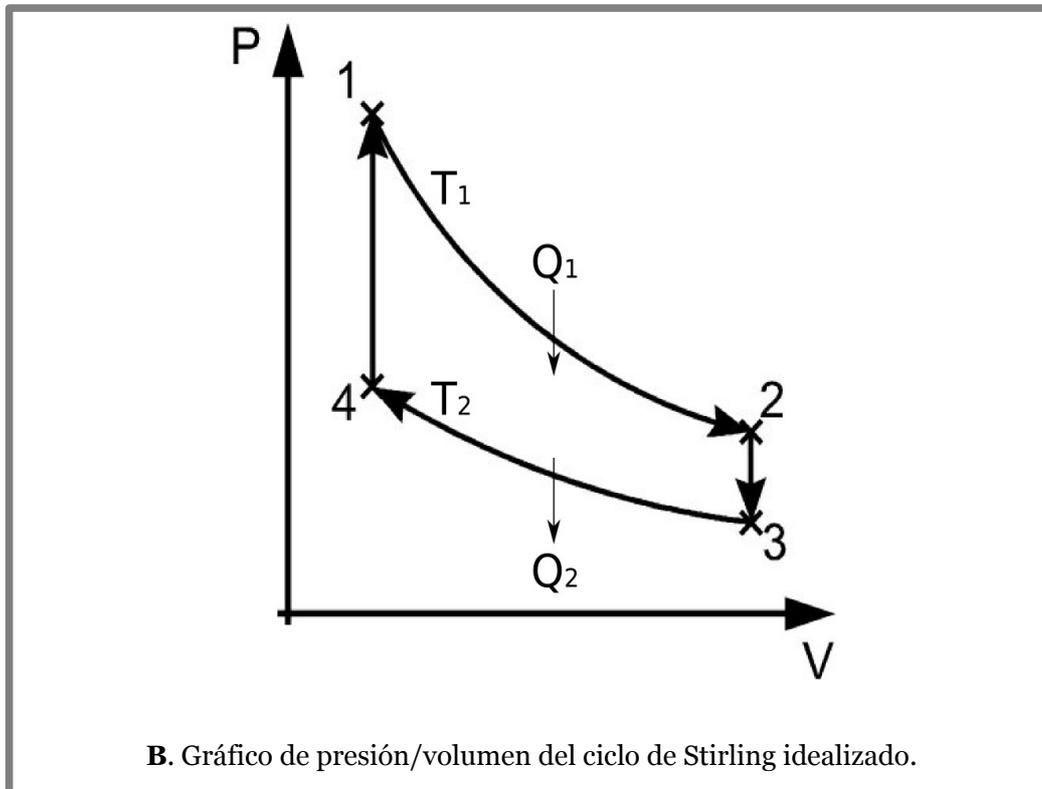
También se está investigando su aplicación en diversos campos. Por ejemplo, ha llamado la atención de los proyectistas de submarinos ya que no produce ruidos ni vibraciones. La NASA sigue una línea de investigación orientada a utilizar este motor en

aplicaciones aeroespaciales. También se puede usar ese motor con un reactor nuclear e incluso se estudia utilizarlo como base para fabricar congeladores avanzados para las cápsulas espaciales.

Como contrapartida a sus características favorables, está el hecho de que el fluido de trabajo es gaseoso, lo cual acarrea dificultades operativas. En la práctica, se ha visto que los fluidos de trabajo viables son el hidrógeno y el helio, ambos por buenas propiedades termodinámicas.

Ciclo de Stirling.

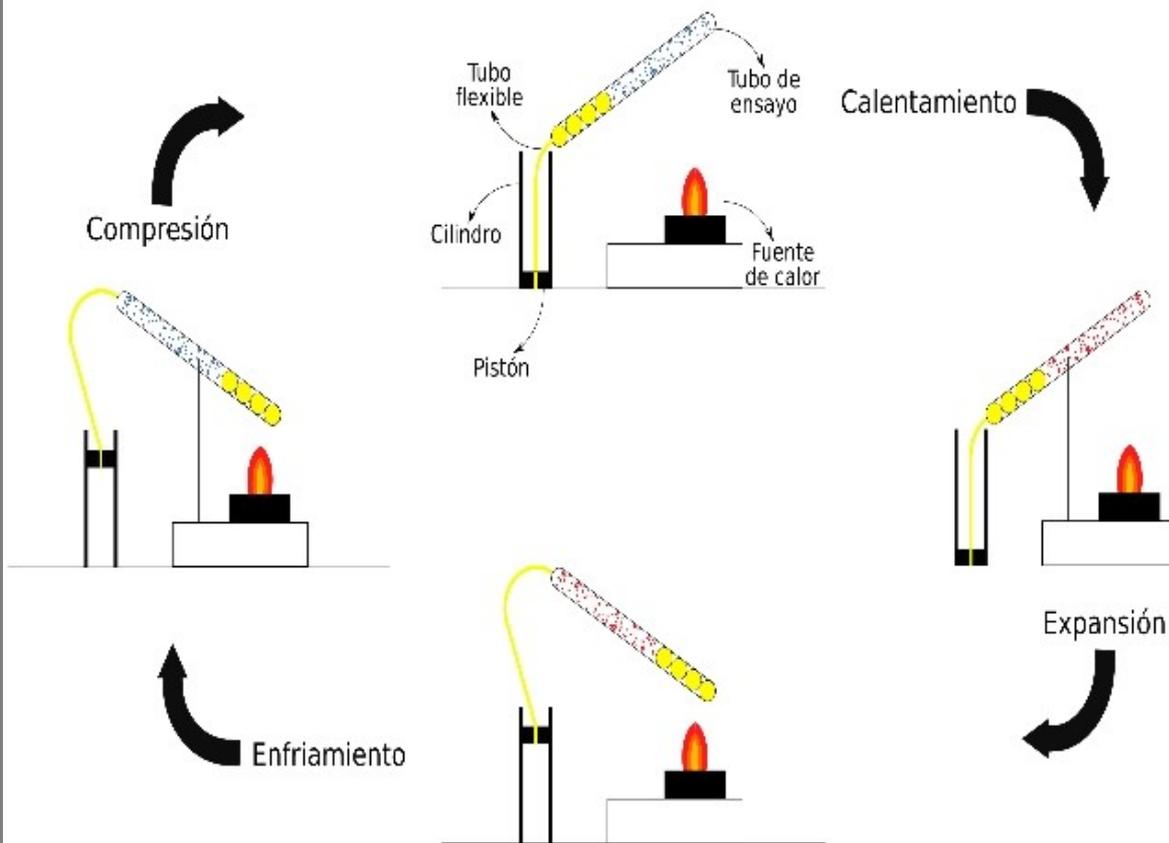
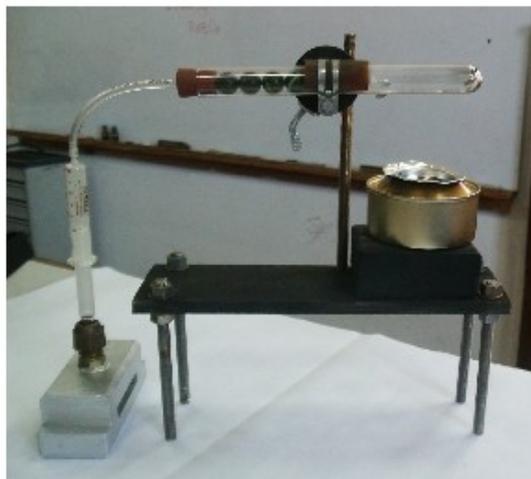
El ciclo de Stirling idealizado consta de cuatro procesos reversibles realizados sobre el gas en el interior del motor. Dos de los procesos son isotérmicos (es decir, procesos realizados a temperatura constante), mientras que los otros dos son realizados a volumen constante. A lo largo de las isotermas 1-2 y 3-4, el motor intercambia cantidades de calor Q_1 a la temperatura T_1 y Q_2 a la temperatura T_2 , respectivamente. A lo largo del camino 2-3, el motor pasa por una serie de temperaturas intermedias al entrar en contacto con una serie de fuentes térmicas que no intercambian energía con el exterior. Por consiguiente, durante la etapa 2-3 la sustancia que realiza el ciclo se enfría cediendo una cierta cantidad de calor que es almacenada internamente por el motor, y que es recuperado a lo largo del camino 4-1 cuando la sustancia que realiza el trabajo se calienta hasta la temperatura inicial. Por lo tanto cuando se completa el ciclo el sistema queda exactamente en el mismo estado en que se encontraba al comienzo. Los cálculos teóricos demuestran que la eficiencia de este ciclo es la máxima posible, es decir la dada por la fórmula 2 del capítulo V.



Funcionamiento.

Durante la muestra les presentamos dos modelos diferentes de máquinas de Stirling, vamos a ver cómo es el funcionamiento de cada modelo, los cuales los nombramos como Modelo 1 y Modelo2.

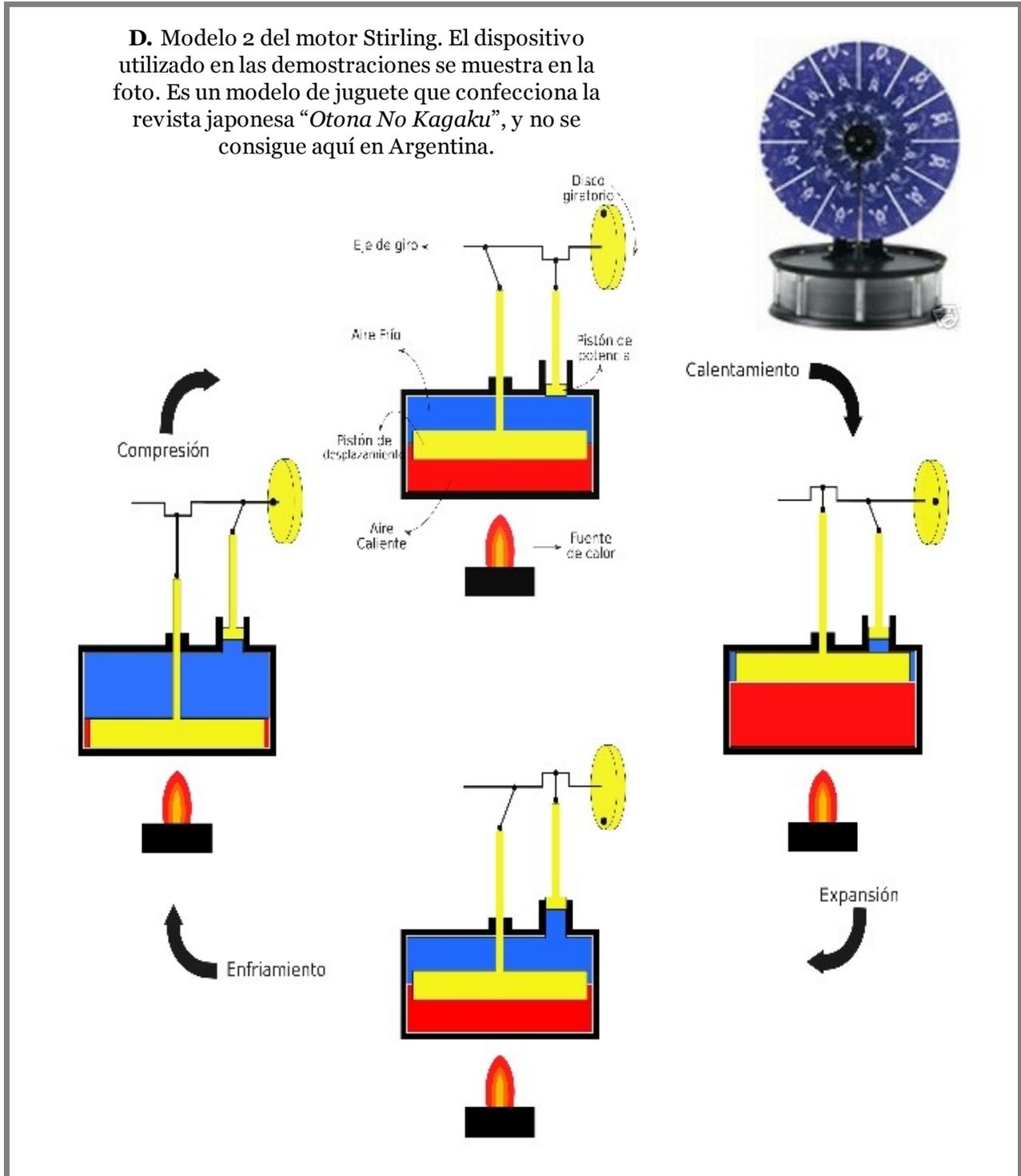
C. Modelo 1 del motor Stirling.
 En la foto se muestra el modelo que hemos construido para la muestra, con una jeringa de vidrio, un tubo de ensayo y bolitas de vidrio



Modelo 1 (figura C).

Este motor Stirling consiste de un tubo de vidrio montado sobre un eje de giro en cuyo interior el aire es sucesivamente enfriado y calentado durante el ciclo de funcionamiento. Posee una bolitas de vidrio que actúan como desplazador intercambiando la masa aire caliente y fría. Además, el tubo de vidrio está conectado al pistón de un cilindro por medio de un tubo flexible que permite la circulación libre del aire. En la figura C, al

comienzo el sistema se encuentra en su mínima temperatura y volumen. Un mechero calienta la masa de aire y, como consecuencia, la presión del aire aumenta hasta vencer la oposición del émbolo y producir la expansión. La disposición mecánica del sistema hace que entonces las bolitas se desplacen al otro extremo del tubo, desplazando al aire hacia la región fría del tubo, con lo cual el aire caliente comienza a enfriarse y, como consecuencia de la disminución de la presión, se comprime y el sistema vuelve a su estado original.



Modelo 2 (figura D).

Éste es un modelo de juguete diseñado para funcionar con una muy baja diferencia de temperatura entre la zona fría y la zona caliente de la máquina. De hecho, funciona con

sólo apoyar la máquina sobre un vaso con agua caliente. Incluso algunas máquinas de este tipo pueden funcionar con el calor de una mano.

Cuando el aire dentro del motor es calentado se expande y al enfriarse se comprime. El aire dentro del lado caliente del Stirling al expandirse se desplaza al lado frío donde se contrae. El desplazador tiene la misión de cambiar la presión dentro del motor. Cuando hay una diferencia de temperatura entre la parte superior del desplazador y la inferior, la presión del motor cambia por el movimiento del desplazador. La presión aumenta cuando el desplazador está ubicado en la parte superior del motor, y disminuye cuando está ubicado en la parte inferior del motor.

Cuando la presión alcanza su máximo valor por acción del desplazador, el pistón de potencia realiza trabajo sobre el disco rotante. Para esto se lo ubica de tal forma de accionar el eje de giro con un desfase de 90° con respecto a la acción del desplazador. El motor de Stirling funciona gracias al trabajo realizado por el pistón de potencia.

Para investigar y profundizar:

- Haga una pequeña reseña de la historia de los motores Stirling.
- Investigue las aplicaciones de estos motores, en especial en la generación de energía a través de la recolección de luz solar mediante espejos cóncavos.
- Enumere las ventajas y desventajas con respecto a motores de combustión interna en lo referente a rendimiento y polución ambiental.

Actividades para el laboratorio:

- Les proponemos que intenten construir un modelo como el que funciona a bolitas. Es fácil y sólo deben conseguir una jeringa de vidrio que haga las veces de pistón. Ojo, que con una jeringa de plástico no funciona, ya que tienen mucho rozamiento.

Bibliografía y enlaces útiles:

He aquí algunos libros de consulta permanente en termodinámica:

- Mark W. Zemansky, “Calor y termodinámica”, 4.a ed., Aguilar, 1961.
- Julio Gratton, “Termodinámica e introducción a la mecánica estadística”.

Algunas páginas en internet dedicadas específicamente a motores Stirling (en la segunda se explica cómo se construye el modelo a bolitas):

http://en.wikipedia.org/wiki/Stirling_engine
http://www.nmri.go.jp/eng/khirata/stirling/testtube01/index_e.html
http://www.cec.uchile.cl/~roroman/cap_10/strlng1.htm
<http://www.sbp.de/es/html/solar/dish-stirling.html>

7 - Imanes en todas partes

Algunas experiencias con magnetismo e inducción magnética.

En este capítulo vamos a centrarnos en el estudio de los fenómenos magnéticos que les hemos presentado en el laboratorio itinerante. Todos tenemos una idea básica de lo que es el magnetismo ya que los imanes están presente habitualmente en nuestra vida. Desde los imanes de las casa de comidas que pegamos en la heladera, el cierre mismo de la heladera, los cierres de las puertas de placard, los motores, automóviles, tarjetas de crédito, la memoria del disco rígido de la computadora, y miles de ejemplos más. La propia tierra tiene propiedades magnéticas, así que se puede considerar que estamos viviendo en un gran imán.

La humanidad conoce el fenómeno del magnetismo desde antes del año 600 A.C., con el descubrimiento del mineral *magnetita*, que posee la propiedad de atraer ciertos objetos metálicos. Hacia el año 1000 D.C. Ya se utilizaba esta propiedad para construir brújulas que fueron esenciales para la navegación de la época (y aún lo siguen siendo). En la figura A se aprecia un trozo de esta piedra natural, la cual está atrayendo algunos clavos y limadura de hierro. A todos estos imanes naturales se los denomina *permanentes*, ya que la propiedad magnética que presentan, llamada *ferromagnetismo*, permanece constante en el tiempo (no se pueden “apagar”). Para poder quitarles dicha propiedad hay que actuar sobre el material, por ejemplo, aumentándoles su temperatura lo suficiente para que se produzca una transición de fase (¿recuerdan el capítulo 1?) hacia un estado no magnético.



A: Magnetita atrayendo objetos de hierro

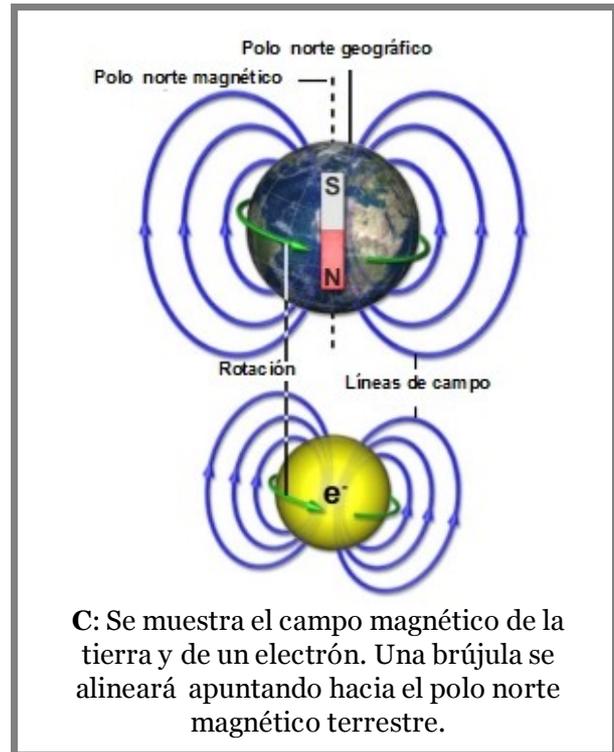
Todos los imanes presentan dos *polos*, denominados Norte y Sur. Cuando se acercan dos objetos imantados, sus polos de distinta denominación se atraen, y los iguales se repelen. La fuerza de atracción que el imán ejerce sobre un objeto ferromagnético en cualquier punto de su entorno se representa por una magnitud denominada *campo magnético*, el cual representa para cada punto del espacio la dirección, sentido e intensidad de la fuerza que experimentaría una partícula magnética ubicada en ese punto. Claramente, el campo magnético es simplemente una construcción matemática que se utiliza para describir la atracción que ejerce el imán. Sin embargo, su utilidad es muy importante como forma de descripción del fenómeno magnético. También se lo puede “visualizar” utilizando limaduras de hierro. La figura B muestra la imagen



B: Campo magnético de un imán

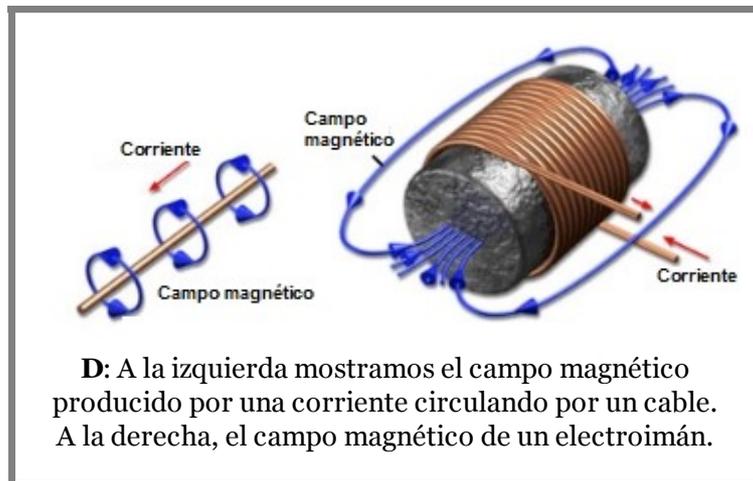
de una barra imantada en donde se pueden ver las líneas de campo magnético gracias a las limaduras de hierro. Estas líneas indican en qué sentido una partícula magnética experimentará una fuerza (es decir, una partícula experimentará una fuerza en la dirección de la línea de campo en la cual se encuentra), y la densidad de líneas nos indica qué intensa será dicha fuerza en ese lugar.

Como ya dijimos, la tierra también tiene propiedades magnéticas, y tiene su respectivo polo norte y polo sur magnéticos. Éstos no están ubicados exactamente sobre los polos norte y sur geográficos, están levemente desplazados y se mueven muy lentamente en el tiempo. La figura C muestra esquemáticamente esta situación, y muestra también el campo magnético generado por la tierra. Al igual que ésta, pero a una escala muchísimo menor, los electrones (que son partículas elementales que conforman los átomos de los diferentes elementos químicos), también tienen su magnetismo (se lo suele llamar en la jerga *momento magnético*) asociado (ver figura C). Ambos están relacionados con sus movimientos de rotación, como veremos a continuación.



C: Se muestra el campo magnético de la tierra y de un electrón. Una brújula se alinearía apuntando hacia el polo norte magnético terrestre.

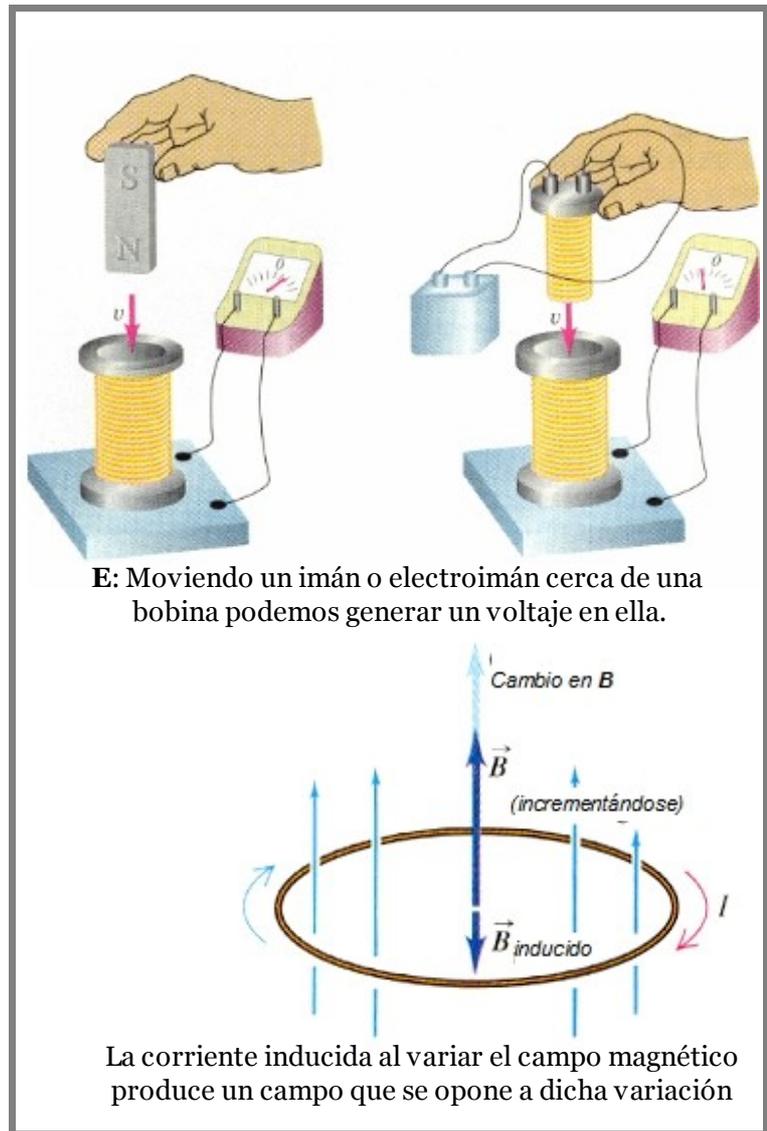
Hay otra forma de producir campo magnético, y es a través de la circulación de corriente eléctrica (flujo de electrones a través de un conductor). Cuando una corriente eléctrica circula por un cable, se produce un campo magnético que rodea al cable en forma circular. Apreciamos esto en el primer dibujo de la figura D. Si al cable lo enrollamos sobre un eje central o núcleo (a eso lo llamamos *bobina* o *solenoides*), logramos lo que se llama un electroimán o imán transitorio, ya que podemos apagar o prender a voluntad. Aquí, el campo magnético de cada espira se suma y termina produciendo un campo como el mostrado en la figura D.



D: A la izquierda mostramos el campo magnético producido por una corriente circulando por un cable. A la derecha, el campo magnético de un electroimán.

En el caso de los electroimanes, es el movimiento de los electrones a través del conductor lo que genera el campo magnético. En el caso de los imanes permanentes, el magnetismo es generado por la rotación de los electrones y/o translación alrededor del núcleo que se coordinan entre sí para que los momentos magnéticos apunten todos en la misma dirección. En otros materiales estos momentos magnéticos siguen existiendo pero están descoordinados y apuntan en diferentes direcciones, anulándose entre sí. También la tierra produce su campo magnético mediante el flujo del material ferromagnético de su núcleo producido por la rotación terrestre.

Y así como las corrientes pueden producir campo magnético, también los campos magnéticos pueden producir corrientes eléctricas. Todo elemento que posea un campo magnético y se mueva respecto de un conductor eléctrico genera en éste una corriente eléctrica, al inducir en el mismo un voltaje (ley de Faraday). También la generarán si están quietos pero su campo magnético varía en el tiempo. Lo importante es que, desde el punto de vista del conductor, éste se halle dentro de un campo magnético que varíe con el tiempo, ya sea porque (por ejemplo) se apaga y se prende un electroimán cercano, o se mueve un imán permanente cerca de él. La figura E ejemplifica esta situación, en donde se mueve cerca de un solenoide conectado a un medidor de voltaje. Cuando se mueve cerca de él un imán permanente o un electroimán, el medidor nos avisa que se está induciendo un voltaje en la bobina.



La corriente inducida en el conductor, por lo que vimos antes, también genera un campo magnético a su alrededor, pero con una particularidad, este campo inducido se *opone* a la variación original de campo (figura E). Y si esta variación fue causada por el movimiento de un imán, por ejemplo, la fuerza sobre este imán que ocasiona el campo inducido se *opondrá* al movimiento del mismo. Ésto es lo que se conoce como ley de Lenz.

Resumamos un poco entonces. Si tomamos un imán permanente, éste posee un campo magnético a su alrededor. Si lo acercamos a un objeto ferromagnético el imán lo atraerá. Si lo acercamos a un objeto metálico no magnético, y lo hacemos muy lentamente, no observamos ninguna fuerza. Pero si lo intentamos mover un poco más rápido empezamos a observar una fuerza debida a la inducción magnética, que será más grande cuanto más rápido intentemos mover el imán, y siempre se *opondrá* al movimiento del mismo. Pero nos queda todavía una propiedad que no tuvimos en cuenta. La fuerza que experimente el imán en movimiento dependerá de tipo de objeto metálico respecto del cual lo movemos. Cuanto mejor conductor sea, mayor será la fuerza.

Pero, ¿qué significa “mejor conductor”? Todos sabemos que por los cables circula electricidad, o dicho más apropiadamente, circula corriente eléctrica. La corriente eléctrica es el movimiento de electrones en un material, y ésta circula mucho más fácilmente en los materiales llamados conductores eléctricos. Los materiales en los cuales

la corriente no circula se llaman aislantes. Los materiales metálicos son en general buenos conductores, en particular el cobre (con el cual se hacen los cables), la plata y el oro son muy buenos conductores. Los plásticos son aislantes (por eso la cobertura o *vaina* de los cables es de plástico, para que al tocarlos la corriente no penetre en nuestro cuerpo). La propiedad que define si un material es buen o mal conductor de la electricidad es la *resistencia eléctrica*. A mayor resistencia, mayor dificultad para el paso de la corriente. Los buenos conductores tienen resistencias muy bajas. Respecto al tema que nos compete, si movemos un imán en cercanías de un objeto, se generará en éste un voltaje. Si el material tiene una resistencia baja, este voltaje generará una corriente apreciable, con lo cual la fuerza que observamos en el imán al intentar moverlo será grande. Si el material tiene una resistencia alta, con el mismo voltaje inducido se generará una corriente muy pequeña, por lo tanto se observará una fuerza muy pequeña sobre el imán. A mayor resistencia, menor fuerza, y viceversa.



F: En este experimento se hacen rodar dos cilindros, uno magnético (el más chico), el otro no magnético (el más grande), por rampas diferentes. Las dos primeras rampas son de aluminio (a diferentes temperaturas). La tercera es de plástico y la cuarta de madera.

Como ejemplo de aplicación podemos ver lo que pasa cuando se hace rodar un cilindro magnético y otro no magnético sobre rampas de igual inclinación pero de diferente material. El cilindro magnético es un imán de Neodimio de alta potencia. El cilindro no magnético es un cilindro de cobre. Hay cuatro rampas de igual inclinación, dos de aluminio, una de plástico y una de madera. El cilindro de cobre se desplaza de igual forma por las cuatro, indicando que no hay una diferencia entre ellas para dicho objeto. Cuando se hace rodar el cilindro magnético sobre las rampas de plástico y madera tampoco se observa nada particular, ya que en éstos, al ser materiales aislantes, no se generan corrientes inducidas. Sin embargo, cuando se hace rodar el imán sobre la rampa de aluminio, éste se frena visiblemente, por efecto de las corrientes inducidas que se oponen al movimiento del imán. Si dispusiéramos de rampas de cobre, seguramente el efecto de frenado sería mayor ya que el cobre tiene una resistencia menor que el aluminio, y recordemos que a menor resistencia, más corriente y más fuerza de frenado.

Podemos todavía hacer con éste sistema un experimento más, enfriando a temperatura de nitrógeno líquido una de las dos rampas de aluminio. Cuando hacemos esto y rodamos

el imán por las dos rampas, nos damos cuenta que por la rampa fría el imán se frena aún más, y esto quiere decir que la fuerza debido a las corrientes inducidas es mayor. Si la corriente es mayor, la resistencia del material frío resulta ser menor que la del material a temperatura ambiente. Aquí descubrimos otra propiedad de los metales: su resistencia baja al bajar la temperatura. Con este mismo dispositivo se puede ir experimentando con diferentes materiales y estudiar su comportamiento al hacer rodar el imán sobre ellos.

📅 ✎ Para investigar y profundizar:

- Las palomas tienen dentro del cráneo dominios múltiples de magnetita conectados a un gran número de nervios del cerebro. ¿Cómo le ayuda esto a la paloma a orientarse? (También hay material magnético en el abdomen de las abejas).
- Investiga sobre el magnetismo terrestre, qué lo produce, cómo se lo detecta. ¿Por qué se llaman Polo Norte y Sur a los polos de un imán? Describe la relación con los polos terrestres.

👏 ✂ Actividades para el laboratorio:

- Magnetismo en la alacena: Sostené una brújula en sentido vertical, inmediatamente abajo de la parte superior de varios objetos de hierro o de acero del salón de clases o de tu casa (radiadores, refrigeradores, archiveros, etc...). Observa si el polo norte de la brújula apunta hacia la parte superior de los objetos y el polo sur a la parte inferior. Si es así, esto indica que los objetos se han magnetizado por la influencia del campo magnético terrestre. Ahora, colocá la brújula al lado de una lata de algún alimento que esté en la alacena. Observá si la lata está magnetizada. Invertí la lata y determiná cuántos días tarda en perder su magnetismo e invertir su polaridad.
- Se puede medir el campo magnético de cualquier imán sólo con la ayuda de una brújula (y buscando el valor del campo magnético de la tierra en un manual), midiendo el ángulo de deflexión de la aguja al acercarle el imán. Busca en libros o en internet cómo realizarlo.

📖 🖥 Bibliografía y enlaces útiles:

Algunas de las imágenes de este capítulo han sido extraídas y adaptadas de estos sitios (en inglés) que poseen muy buenas explicaciones también:

<http://www.magnet.fsu.edu/education/tutorials/magnetacademy/magnets/>
http://www.physics.uiowa.edu/~umallik/adventure/nov_06-04.html

Proveedor de imanes de Neodimio de alta potencia:

www.distriman.com.ar

Otros enlaces posibles:

<http://es.wikipedia.org/wiki/Magnetismo>

Libros:

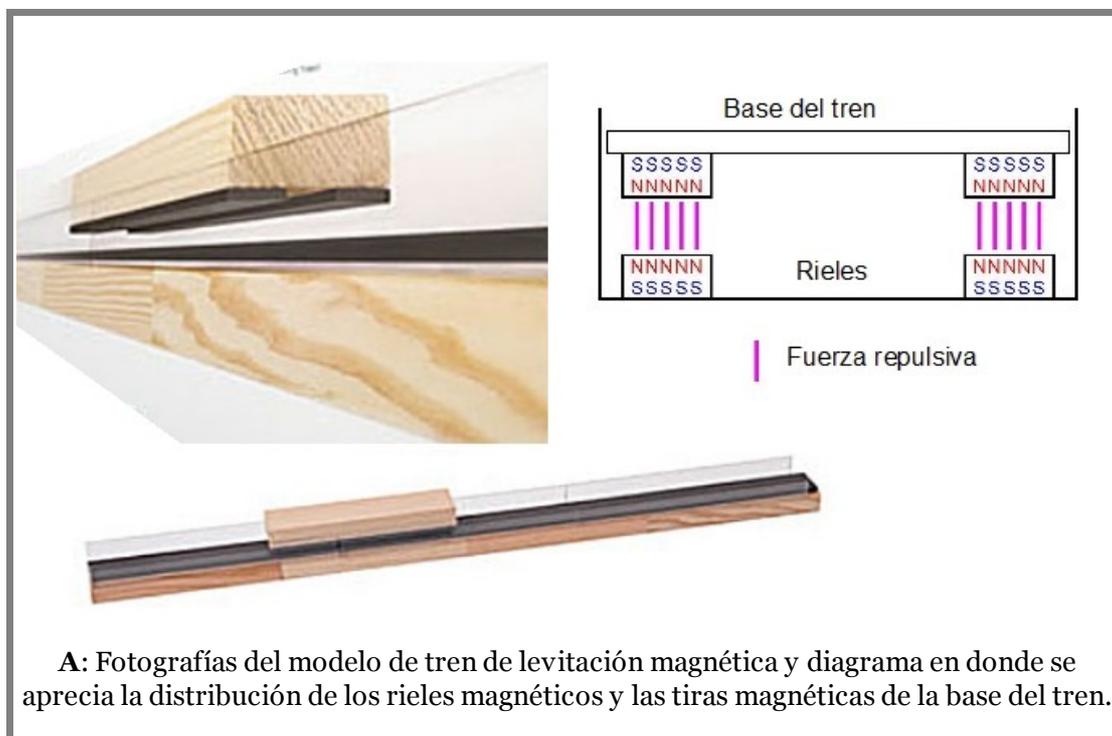
Física II, Editorial Santillana.

8 – Trenes que levitan

Increíbles modelos de aplicación de un fenómeno magnético complejo.

Como recordarán de los experimentos de la muestra, las últimas demostraciones fueron dedicadas a modelos de trenes que funcionan con levitación magnética. En este capítulo final de esta guía daremos explicaciones lo más sencillas posibles de estos fenómenos físicos complejos.

El primer modelo mostrado se basa en la levitación magnética. La vía están constituidas por dos tiras imantadas que conforman cada uno de los rieles, las dos con uno de sus polos hacia arriba (se puede pensar cada uno de los rieles también como una serie de imanes en hilera, todos con la misma polaridad, por ejemplo, el norte hacia arriba). El tren (en este caso sólo un bloquecito de madera) posee una base con dos tiras que se enfrentan con los rieles con el mismo polo, de manera que se genere una fuerza de repulsión entre ellos. La figura A muestra una fotografía del modelo, junto con un diagrama que esquematiza la disposición de los imanes del tren y de los rieles.

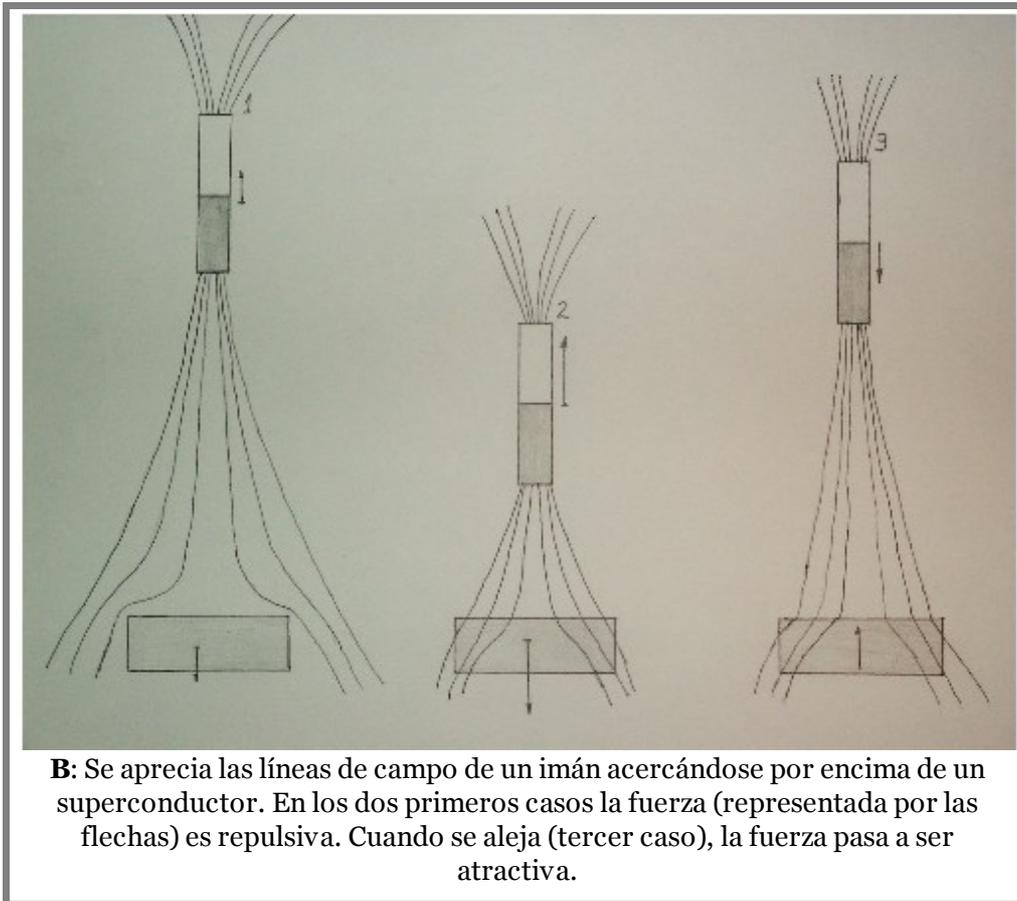


A: Fotografías del modelo de tren de levitación magnética y diagrama en donde se aprecia la distribución de los rieles magnéticos y las tiras magnéticas de la base del tren.

La fuerza repulsiva entre los rieles y la base del tren es la que mantiene al tren levitando. Ésto lo hace consiguiendo que el tren se ubique en una posición tal que la fuerza magnética se cancele con el peso. Si el tren se mueve hacia abajo, la fuerza magnética aumenta y lo tira para arriba. Si el tren sube más de la cuenta, el peso gana y el tren se mueve hacia abajo. El único detalle es que este modo de levitación genera una fuerza que es inestable en el sentido horizontal. Es decir, ante una minúscula fuerza lateral el tren se desequilibra y puede caer, por eso es que se coloca unas paredes laterales en el modelo para estabilizar la levitación y evitar que el modelo se caiga al andar. En los prototipos de trenes a escala real esto se logra mediante otros sistemas magnéticos, en general, electroimanes laterales. También con electroimanes se logra el mecanismo de propulsión, que no está presente en los modelos que presentamos.

El otro modelo de tren que hemos demostrado involucra la utilización de un tipo de material muy particular llamado *superconductor*. El fenómeno de la superconductividad

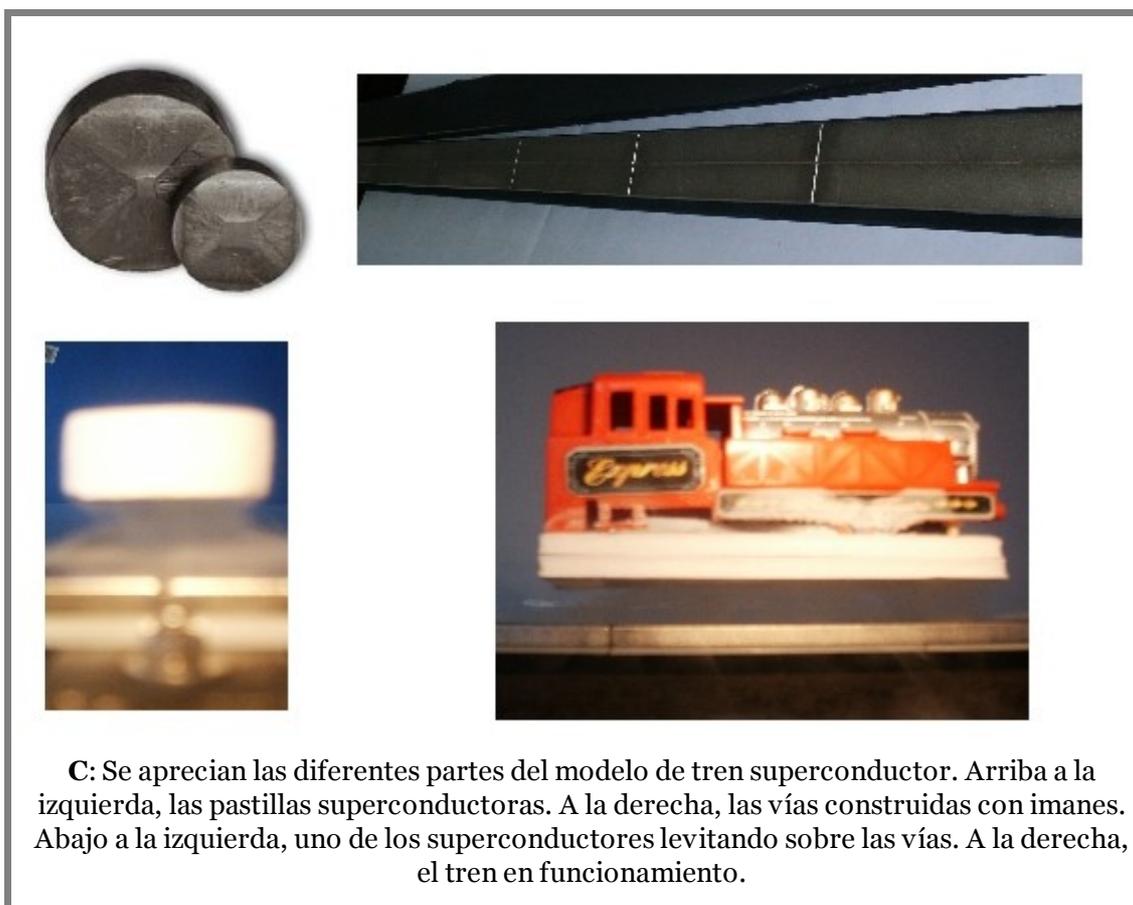
es muy complejo, pero trataremos de explicarlo muy brevemente aquí. Como toda explicación sencilla de un fenómeno complejo, resultará sumamente incompleta, arbitraria y (hasta cierto punto) no tan acertada. Pero lo intentaremos igual.



Ya hemos visto en el capítulo anterior que todos los materiales tienen una resistencia eléctrica, que indica el grado de dificultad que tiene la corriente eléctrica para circular por el material. Hay ciertos materiales que si bien a temperatura ambiente son materiales “normales”, en el sentido que tienen una resistencia determinada, cuando se los enfría por debajo de una temperatura llamada *temperatura crítica*, experimentan un cambio de estado en el cual no tienen resistencia eléctrica. Esto quiere decir que se comportan como conductores perfectos, con resistencia cero (no oponen resistencia al paso de la corriente). Por este hecho se los llamó *superconductores*. Este hecho es tecnológicamente importante ya que si no se tiene resistencia, se puede transportar energía sin costo. El estado superconductor es un estado termodinámico, por lo tanto en la temperatura crítica se produce una transición de fase del estado normal (alta temperatura) hacia el superconductor (a baja temperatura). Lamentablemente no se ha encontrado hasta ahora superconductividad a temperatura ambiente, y las temperaturas críticas de los materiales superconductores son realmente muy bajas, debiéndose alcanzar con ayuda del nitrógeno líquido o hasta, en algunos materiales, temperaturas más bajas aún.

Pero no nos interesan en este capítulo estos materiales por esta propiedad que describimos, sino por sus propiedades magnéticas. Aparte de ser superconductores, estos materiales se comportan también como “superimanes”. En el estado normal no tienen ninguna propiedad magnética, sin embargo, al entrar al estado superconductor, estos materiales adquieren ciertas propiedades muy interesantes. Si empezamos a acercarle un imán por encima de un superconductor, por ejemplo como se indica en el primer caso de la figura **B**, al principio el superconductor no dejará que las líneas de campo del imán

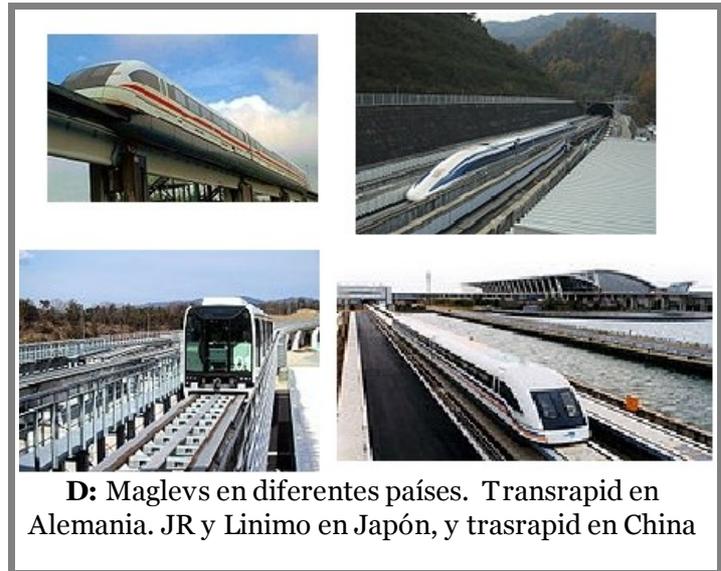
penetren en él. Si seguimos acercando el imán, forzaremos algunas líneas de campo a entrar en el superconductor, pero éstas no se moverán libremente en su interior, sino que quedan “enganchadas” o “ancladas” en los pequeñísimos defectos del material, con lo cual tendremos que hacer fuerza hacia abajo para acercar el imán (se genera una fuerza repulsiva entre el imán y el superconductor). Llegado el caso, el imán quedará flotando sobre el superconductor ya que la fuerza peso quedará balanceada con la fuerza debida al anclaje de las líneas de campo (caso 2 de la figura **B**). Esta levitación, a diferencia de la levitación magnética explicada anteriormente, es una levitación estable (no es sensible a fuerzas horizontales), y por lo tanto podemos prescindir de las paredes laterales. El imán quedará flotando en una posición de equilibrio estable sobre el superconductor. Por otro lado, si en este estado comenzamos a alejar el imán hacia arriba, se generará una fuerza atractiva entre el imán y el superconductor, ya que las líneas de campo que ya entraron no pueden salir fácilmente, tirando del imán hacia abajo (caso 3 de la figura **B**).



En el modelo de tren en realidad están invertidos los elementos. El riel está construido de imanes permanentes, y el que queda suspendido en el aire levitando es el superconductor, que está dentro de la locomotora. Dentro de ella se coloca nitrógeno líquido para mantener frío el superconductor. Éste es un cilindro de un material compuesto que tiene la apariencia de un cerámico (la fórmula química es $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$). Cuando se enfría el superconductor por primera vez, se lo coloca en posición en la vía. Una vez frío, el superconductor queda levitando debido a que la fuerza del anclaje de las líneas de campo magnético compensan el peso del superconductor más la locomotora. El modelo y sus partes se aprecian en la figura **C**.

Si bien se puede pensar que estos modelos de trenes que hemos presentado son sólo juguetes sofisticados, en realidad ya hay funcionando en el mundo trenes de verdad que operan con estos principios. Son los llamados Maglev (por “magnetic levitation”). En

Alemania corre el Transrapid con un largo de 31 Km, y alcanza los 420 Km/h de velocidad. Utiliza levitación magnética exclusivamente. En Japón hay un prototipo maglev (JR) que funciona con levitación por superconductores, y ha alcanzado velocidades récord de 570 Km/h. También posee un maglev magnético urbano de 8 km (Linimo). Otros países que poseen maglevs son Corea del Sur y China, que posee un prototipo de tren superconductor en funcionamiento, y un maglev magnético (transrapid de Shanghai). Todos ellos alcanzan velocidades del orden de 500 Km/h.



D: Maglevs en diferentes países. Transrapid en Alemania. JR y Linimo en Japón, y trasrapid en China

📅 ✎ Para investigar y profundizar:

- ¿Cuál es la utilidad de hacer trenes levitados? ¿Cómo se comparan con los trenes de alta velocidad convencionales en cuanto a costo operativo, costo de construcción, polución ambiental y seguridad operativa?

👏 ✂ Actividades para el laboratorio:

- Un modelo de tren superconductor es muy difícil de armar como proyecto dado el alto costo de los materiales. Sin embargo, se puede construir con un poco de maña y comprando imanes baratos un modelo de tren de levitación magnético. Para realizarlo se puede consultar la bibliografía más abajo, o bien buscar en internet modelos de maglev (“maglev model train”).

📖 🖥 Bibliografía y enlaces útiles:

Venta en EEUU de un modelo de tren magnético levitado

http://www.fatbraintoy.com/toy_companies/dowling_magnets/magnet_levitation_kit.cfm?display=more

Construcción de un tren levitado con imanes

<http://www.coolmagnetman.com/magtrain.htm>

Maglevs (wikipedia, en inglés y español). La versión en inglés está más completa.

http://es.wikipedia.org/wiki/Tren_de_levitaci%C3%B3n_magn%C3%A9tica

[http://en.wikipedia.org/wiki/Maglev_\(transport\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Maglev_(transport))

Shanghai transrapid official site

<http://www.smtdc.com/en/index.asp>

Trenes superconductores en youtube

<http://www.youtube.com/watch?v=5e11A5B-h3Q>

Artículo sobre levitación superconductora

http://www.aragoninvestiga.org/investigacion/temas_todo.asp?id_tema=162&intPagActual=5&categoria=Ciencias+Experimentales&id_categoria=290

Folleto tren superconductor

http://www.ifw-dresden.de/offers/downloads/dateien/magnetschwebbahn_engl.pdf

Proveedor de imanes de Neodimio de alta potencia:

www.distribiman.com.ar



Unas palabras finales

En primer lugar, queremos agradecer especialmente a la autoridades de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la Universidad de Buenos Aires, que a través del apoyo económico brindado mediante los subsidios “Exactas con la Sociedad 2008-2009” nos han permitido completar la serie de experimentos que conforman esta muestra, y permitir la llegada de la muestra a las escuelas secundarias.

En segundo lugar, agradecemos el apoyo recibido por parte del Laboratorio de Bajas Temperaturas (FCEyN-UBA), del cual forma parte la base sobre la que armamos el Laboratorio Itinerante y nos provee constantemente del vital nitrógeno líquido. Al personal técnico del LBT, Diego Melgarejo, Dante Giménez y Eduardo Pérez Wodke, que mantienen en funcionamiento toda la maquinaria de producción de líquidos criogénicos. Al personal científico que nos ha brindado sus consejos y sugerencias: Victoria Bekeris, Carlos Acha, Gabriela Pasquini, Alejandro Moreno, Hernán Ferrari y Diego Pérez Daroca.

Finalmente, a todos los que apoyaron el proyecto, familiares, amigos y colegas, por su infinita paciencia. A las escuelas que nos han recibido, su personal directivo y docente, y sus alumnos, destinatarios finales de todos nuestros esfuerzos.

A todos ellos, ¡muchísimas gracias!

Los autores.

Información sobre carreras científicas en la UBA

Para aquellos que les interese seguir una carrera científica, en este enlace pueden obtener información sobre las carreras que se dictan en la Facultad de Ciencias Exactas de la UBA.

<http://exactas.uba.ar>

En la página principal, abrir la opción “información para futuros estudiantes”, allí encontrará información sobre cada carrera, folletos, planes de estudio e información sobre charlas a ingresantes.

La Facultad de Ciencias Exactas y Naturales cuenta con una Dirección de Orientación Vocacional, que funciona dentro de la órbita de la Secretaría de Extensión, Graduados y Bienestar (SEGB), en Planta Baja del Pabellón II (Ciudad Universitaria). La DOV organiza mensualmente charlas por carrera y recorridas por laboratorios y Departamentos de la Facultad. Esta actividad está especialmente destinada a quienes están eligiendo su carrera y en todos los casos las charlas las dan docentes e investigadores de la Facultad.

Para aquellos estudiantes orientados a las ciencias exactas y naturales que necesiten ayuda en la elección de su carrera, para los alumnos de la Facultad que deban elegir su orientación, y para quienes se replanteen su elección de carrera, la DOV realiza consultas de orientación vocacional.

Las carreras que se pueden estudiar en la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales son:

- Licenciatura en Ciencias Biológicas
- Licenciatura en Ciencias de la Atmósfera
- Licenciatura en Ciencias de la Computación
- Licenciatura en Ciencias Físicas
- Licenciatura en Ciencias Geológicas
- Licenciatura en Ciencias Matemáticas
- Licenciatura en Ciencias Químicas
- Licenciatura en Oceanografía
- Licenciatura en Paleontología
- Licenciatura en Ciencia y Tecnología de Alimentos