Móviles perpetuos

J. Güémez
Departamento de Física Aplicada.
Universidad de Cantabria.

Diciembre 12, 2003

1 Introducción.

Una de las más antiguas pasiones humanas es la de poder vivir sin trabajar. Paradójicamente, a satisfacer este deseo se le ha dedicado mucho esfuerzo. En este afán se han imaginado toda clase de sistemas maravillosos para lograrlo, desde los que permiten obtener energía a partir de la nada (y que se denominan *Móviles Perpetuos de Primera Especie* o MPPE), hasta los que permiten obtener energía mecánica a partir de una sola fuente de calor (y que se denominan *Móviles Perpetuos de Segunda Especie* o MPSE), pasando por aquellos que alcanzando el cero absoluto de temperaturas permiten una transformación completa de calor en trabajo en procesos cíclicos (y que se podrían denominar *Móviles Perpetuos de Tercera Especie*). La imposibilidad de funcionamiento de cada uno de estos móviles puede ser elevada a la categoría de Principio, dando lugar respectivamente al Primer, Segundo y Tercer Principios de la Termodinámica. Y si el móvil concreto que se estudia (presuntamente perpetuo) está bien diseñado, permite obtener importantes relaciones físicas.

2 Móviles perpetuos

La posibilidad de encontrar una máquina que haga todo el trabajo y no consuma nada es una antigua aspiración humana. Incluso antes de que se conocieran importantes conceptos físicos actuales, como por ejemplo en la época griega clásica y en la época medieval, ya se estaba intentando construir máquinas de este tipo. De hecho, mientras no exista una ley física en contra de tales construccions, parece perfectamente legítimo intentar una búsqueda de este clase de beneficio. Esta clase de máquinas, que no sólo se mueven de forma constante sino que producen más energía de la que consumen, se denominan ahora *Móviles Perpetuos de Primera Especie o MPPE*, y hasta el momento no se ha encontrado ninguno que funcione [1]. Como resultado de esta búsqueda y del hecho de que ninguna de estas máquinas cumple con sus presuntos cometidos se elevó a la categoría de principio que tales máquinas no podían existir. En este sentido, estos móviles perpetuos han contribuido a que se enuncie y acepte el *Principio de Conservación de la Energía o Primer Principio de la Termodinámica.*

Otra máquina propuesta ha sido la denominada máquina del imán. Esta la inventó el obispo J. Wilkins y consta esencialmente de un imán colocado a una cierta altura, una bola que es atraída por el imán y dos canaletas. La canaleta superior tiene dos orificios, al principio y al final, y conecta la bola con el imán. Atraida por el imán, la bola rueda sobre la canaleta y al llegar al final de la misma, un orificio hace que la bola caiga y vuelva mediante una canaleta inferior al principio, donde el proceso vuelve a empezar. La idea es utilizar la energía cinética de la bola en la subida, que llegue parada al orificio superior y que caiga atraída por la gravedad hasta el comienzo. Naturalmente, la falacia del razonamiento anterior estriba en que si el imán es capaz de atraer la bola situada en la parte inferior poco le va a importar el orificio que se abra en la parte superior. La bola continuará subiendo y quedará firmemente pegada al imán.

Pero una vez que se admitió que el calor era una forma de energía y que el Primer Principio de la Termodinámica implicaba una relación entre trabajo mecánico y calor, se empezó la búsqueda de otra clase de móvil perpetuo. En este caso se trataba de lograr que la energía térmica acumulada en un lago, el mar, un río, etc., pudiese ser extraída y convertida en trabajo mecánico en un proceso cíclico. Ahora no existía una contradicción entre este propósito y el Principio de Conservación de la Energía, pues se trataba de transformar una cierta cantidad de energía térmica (proporcionada por el Sol, por ejemplo)

[1]En el siglo XIX la Academia Francesa de las Ciencias editó un folleto tipo para contestar automáticamente a todos los que enviaban prototipos de móviles perpetuos en que página y línea de su artículo se encontraba el primer error.

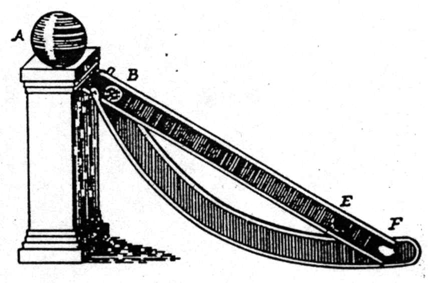

Figura 1: Móvil perpetuo magnético descrito en el libro de J. Wilkins *Una centena de invenciones*. (V. M. Brodianski, *Móvil perpetuo antes y ahora*, Ed. Mir, Moscú (1989)).

utilizando una terminología coloquial, o energía interna, utilizando un lenguaje más técnico, en la misma cantidad de energía mecánica, o trabajo útil, con lo que la energía total permanecía constante. Esta clase de máquinas se denominan ahora *Móviles Perpetuos de Segunda Especie o MPSE* y tampoco parece que exista ninguno que pueda fucionar realmente. De nuevo la aparente imposibilidad de obtener esta clase de máquinas llevó a elevar a la categoría de principio el hecho de que tales máquinas no se pueden construir. Surge así el *Segundo Principio de la Termodinámica* que, en una de sus formulaciones, explicita que no es posible obtener nada de trabajo mecánico a partir de una única fuente de calor sin que nada más cambie, es decir, en procesos cíclicos.

Pero incluso el Segundo Principio permite, en principio, una conversión completa de calor en trabajo (en principio) si se dispone de un foco a la temperatura del cero absoluto. En ese caso, todo el calor extraído de un foco de calor se transforma íntegramente en trabajo mecánico, no se cede nada al foco que se encuentra en el cero absoluto, este no varía su temperatura, el foco más caliente puede disminuir, en principio, su temperatura hasta el cero absoluto y se puede obtener trabajo mecánico ininterrumpidamente. Esta clase de máquinas se denominaría *Móvil Perpetuo de Tercera Especie o MPTE* y tampoca parece que exista ninguna. La aparente imposibilidad (en este caso más intelectual que real) de obtener esta clase de máquinas

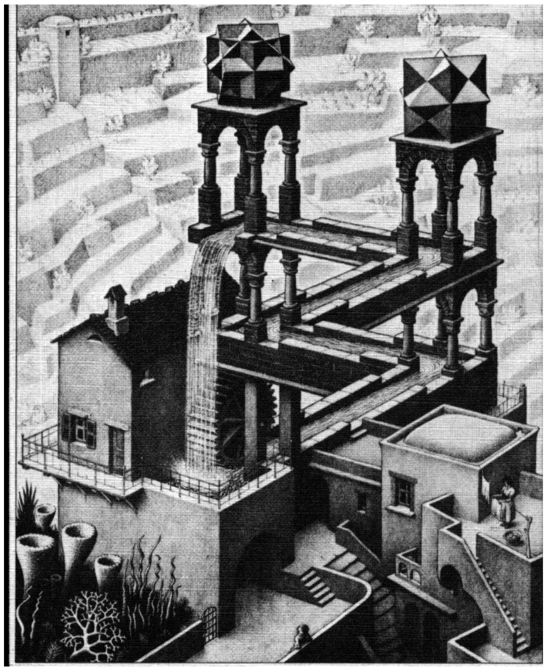

Figura 2: Máquina de Escher. (V. M. Brodianski, *Móvil perpetuo antes y ahora*, Ed. Mir, Moscú (1989)).

lleva a elevar a la categoría de principio que el cero absoluto no se puede alcanzar mediante procesos adiabáticos, lo que a su vez exige que los coeficientes de dilatación se anulen en el cero absoluto . Este es uno de los contenidos del *Tercer Principio de la Termodinámica.* (En realidad, la Termodinámica no se opone a que existan cuerpos en el cero absoluto. Pero si estos existieran, no se podría completar un ciclo de Carnot con uno de ellos como foco frío debido a que mediante procesos adiabáticos no se podría alcanzar esa temperatura.)

En todos los casos es preciso llamar la atención sobre el caracter cíclico de estos procesos o de las máquinas que los realizan. Los autores de estas máquinas tienen muy claro que su verdadera utilidad reside en que se efectuen procesos cíclicos, pues de esta manera se pueden utilizar una y otra vez, y así proporcionar un beneficio de forma ilimitada.

Por supuesto, el movimiento continuo existe bajo diversas formas (movimiento browniano, la rotación de los planetas, corrientes eléctricas en un superconductor, las moléculas de un gas, etc) pero todo eso no sirve para obtener trabajo en procesos cíclicos. Del mismo modo se pueden describir procesos en que todo el calor se transforma en trabajo (por ejemplo en la expansión reversible isoterma de un gas ideal) pero tampoco se trata de procesos cíclicos.

3 Móviles Perpetuos de Primera Especie.

Se van a ver a continuación, sin ánimo de ser exhaustivos, una serie de Móviles Perpetuos que pretenden obtener trabajo sin gasto aparente, es decir, de proporcionar más energía de la que consumen. Se trata, por tanto, de crear energía de forma ilimitada.

3.1 Norias de Gravedad y afines

Como hasta cierto punto resulta lógico, las primeras máquinas MPPE descritas son dispositivos mecánicos más o menos complicados. En todos los casos se trata de dispositivos rotatorios (y este movimiento rotatorio se puede utilizar para producir trabajo útil) que funcionan de tal manera que, supuestamente, nunca se encuentran en equilibrio mecánico. La búsqueda de ese inexistente equilibrio da lugar al movimiento perpetuo.

La idea esencial sería la siguiente. Hay que disponer una serie de masas iguales unidas por una cadena, o por otro procedimiento equivalente, de tal forma que una parte se encuentre desequilibrada con respecto a la otra, y la suma de los momentos de unas masas respecto del eje de giro sea siempre mayor que la suma de los momentos de las otras masas. Bajo el efecto del desequilibrio, las masas se desplazan, se produce un movimiento para acomodarse, y la nueva disposición está tan alejada del equilibrio como la anterior, con lo que de nuevo se produce el movimiento, y así *ad infinitum.*

Por ejemplo, en el caso de la Noria de Gravedad diseñada por James Ferguson, en una parte una serie de varillas acodadas, mantienen una serie de bolas más cercanas al centro de la rueda que lo que mantienen otras bolas colocadas en el lado opuesto. Como cada vez que una bola completa un giro en la parte superior, la varilla acodada la permite que se aleje más del centro, parece que cada vez que llegan arriba las bolas añaden nuevo impulso a la rueda, que así girará indefinadamente. Se lograría entonces que en todo momento apareciera un momento neto que creara el par necesario para mover la rueda.

Las variantes de esta máquina han sido muy ingeniosas. Desde la modificación de George Lipton que diseñó una noria cuyos componentes básicos eran tubos huecos inclinados a lo largo de los cuales rodaban bolas de acero que se alejaban del centro de giro en un lado y se acercaban al eje en el otro dando lugar a un momento neto, hasta

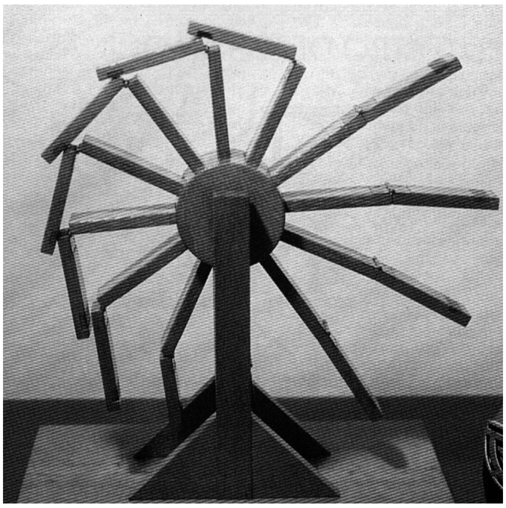

Figura 3: Máquina medieval de Ferguson. (Muy Interesante. Historia de la Tecnología, n° 23, otoño 1995, pag. 40).

el motor de Bhaskara que sustituía las bolas de acero por mercurio líquido. En estos dos casos, cuando el tubo llegaba a la parte superior , las bolas o el líquido corrían rápidamente a la parte más exterior dando nuevo impulso a la rueda. Modificaciones menores dieron lugar al motor de Mariano di Yacopo, al motor de Alejandro Capra y al móvil perpetuo de K. Kai.

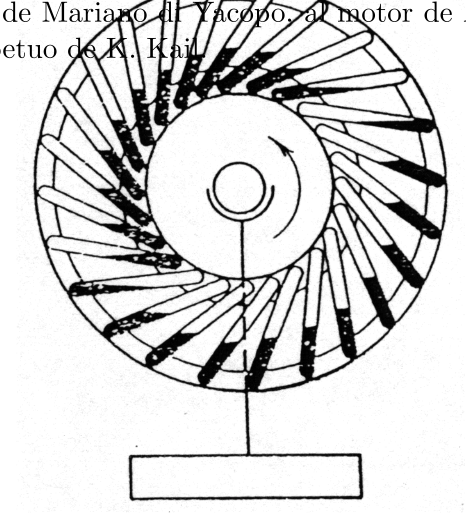

Figura 4: Móvil perpetuo de Baskhara. (V. M. Brodianski, *Móvil perpetuo antes y ahora*, Ed. Mir, Moscú (1989)).

Veamos ahora cómo el físico holandés Stevin obtuvo una interesante aplicación a partir de la imposibilidad de funcionamiento de esta clase de móviles. En su forma más simplificada, las anteriores máquinas se pueden resumir en forma de lo que se denominará Máquina de Cadenas. Si se dispone de dos planos inclinados de diferente longitud y un vértice común, o lo que es lo mismo si el perfil es el de un triángulo no equilátero, sobre este se puede disponer una cadena continua de la forma mostrada en la Figura 1.

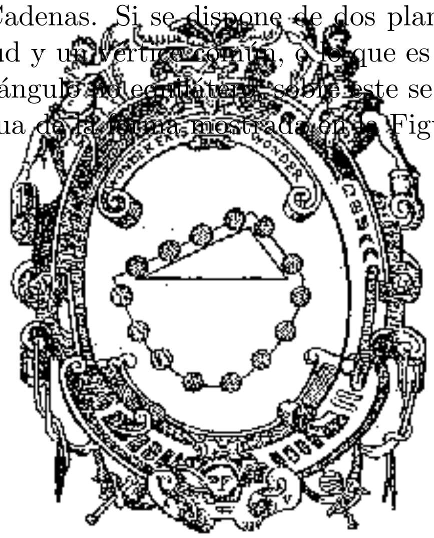

Figura 5: Dibujo de la portada del libro de S. Stevin *Sobre el equilibrio de los cuerpos*. (V. M. Brodianski, *Móvil perpetuo antes y ahora*, Ed. Mir, Moscú (1989)).

Un razonamiento inicial puede ser el siguiente. Puesto que por la parte inferior la cadena se distribuye de forma simétrica, esta parte inferior se equilibra entre sí y no hay que ocuparse de ella. Pero en la parte superior, hay más bolas en un plano inclinado que en el otro. Luego, en principio, al haber más bolas o eslabones de la cadena en el plano inclinado más largo, el peso de esa parte debe arrastrar al peso menor de las bolas o eslabones del plano inclinado menor. (Piénsese en lo que sucede si la cadena se cuelga de una polea, que la cadena se mueve hacia el lugar donde hay más eslabones.) Al arrastralo, el sistema o cadena se mueve como un todo, pero después se recupera la situación inicial, con lo que se volverá a mover y así sucesivamente.

Sin embargo, Stevin razonó a la inversa. Admitió que tal movimiento perpetuo era imposible y que por tanto, dos pesos cualesquiera unidos entre sí por una cuerda se equilibran entre sí en los planos inclinados siempre que sus respectivos pesos sean proporcionales a las longitudes de dichos planos. Es decir, el peso $M = 4B$ o 4 bolas, se equilibra con el peso $M' = 2B$ siempre que el plano inclinado L que lo soporta sea dos veces más largo que el plano inclinado L' que soporta el peso M'.

$$\frac{M'}{L'} = \frac{M}{L}$$

Desde un punto de vista más actual este razonamiento significa tener en cuenta el caracter vectorial de las fuerzas. En este caso, las componentes X de cada fuerza son respectivamente $F_X = Msen\alpha$ y $F'_X = M'sen\alpha'$. Pero a su vez, la relación entre el seno del ángulo, la longitud de cada lado y la altura común h de cada plano inclinado es respectivamente $sen\alpha = h/L$ y $sen\alpha' = h/L'$. Luego en el equilibrio, se tiene que $M(h/L) = M'(h/L')$ de donde se obtiene la relación de Stevin. Si se razona en términos de momentos, también hay que tener en cuenta el caracter vectorial de estos, que para calcular el momento hay que utilizar el producto vectorial y se llega al mismo resultado.

Luego en todos los casos anteriores, es falso que el sistema esté desequilibrado permanentemente, y si lo está debido a un desequilibrio inicial inducido exteriormente, el punto de equilibrio se alcanza con cierta rapidez (dependiendo del posible rozamiento) y el punto de equilibrio es estable. Hay una distribución de las masas que confiere al centro de gravedad del sistema su posición más baja, que es una posición de equilibrio estable. Una interesante consecuencia de todo lo anterior es que se puede demostrar mediante estos razonamientos que todo polígono (o prisma regular) tiene al menos un lado respecto del cual su equilibrio es estable. El máximo encontrado es un polígono convexo de 19 lados que es estable sólo respecto de uno de sus lados.

Un punto interesante a destacar es el siguiente. Por supuesto, existen los móviles perpetuos en un sentido lato. Por ejemplo, la Luna da vueltas alrededor de la Tierra de forma continua. Pero de ese movimiento no se obtiene trabajo. Si se obtuviera trabajo, la Luna iría perdiendo velocidad, se acercaría a la Tierra y el movimiento ya no sería cíclico. En el caso de las máquinas anteriores, si a las máquinas se les da un impulso inicial, se puede lograr que las máquinas estén girando de forma perpetua, con tal de que se cumplan dos condiciones:

1. No haya ninguna clase de rozamiento en ninguna parte de la estructura,

2. No se obtenga nada de trabajo.

Aún cuando no haya ninguna clase de rozamiento, si se obtiene trabajo a partir de la máquina, como máximo se obtendrá el mismo que se le dio al comienzo para sacarla del equilibrio. Por tanto, por Móviles Perpetuos se entienden sistemas que además de moverse indefinidamente, proporcionan energía también de forma indefinida. Por estas razones, Lipton murió convencido de que si lograba que su máquina disminuyera su rozamiento por debajo de un cierto límite, lo que él creía que era un problema superable, su máquina podría funcionar. En el otro extremo se sitúan inventores tales que dotaron a sus máquinas de frenos adecuados en previsión de que la máquina fuese demasiado deprisa. Esta clase de precaución debe considerarse como uno de los grandes actos de fe en la historia de la humanidad.

3.2 Máquina de Zonca y afines.

La máquina de Zonca funciona teóricamente bajo consideraciones algo diferentes de las anteriores. El razonamiento de Zonca es el siguiente. Se dispone de dos tubos huecos que forman una estructura en U invertida. Uno de los tubos es más grueso que el otro y ambos forman un sifón. En principio, ambos tubos se llenan de agua completamente, Zonca tuvo en cuenta esta condición dotando a su máquina de un dispositivo de cebado inicial, y una vez llenos, el extremo del más delgado se introduce en un gran depósito y el extremo del mayor se abre para dejar que el agua caiga libremente y pueda mover una rueda de molino o cualquier otro dispositivo. Al caer el agua del tubo grande, se produce un efecto de succión, o vacío temporal. Entonces, el agua es repuesta por el depósito a través del tubo menor y el proceso puede continuar indefinidamente, o hasta que se acabe el agua del depósito.

Para entender por qué no funciona este motor no hay más que dar la vuelta a los dos tubos y llenarlos de agua. A pesar de que en uno de ellos hay mucha más cantidad de agua que en el otro, las alturas que alcanza el agua en cada uno de ellos es la misma. O lo que es igual, a través del orificio que une ambos tubos la presión es la misma con tal de que el agua alcance la misma altura en cada tubo y con independencia de la cantidad de agua que hay en cada tubo. Este es el Principio de los vasos comunicantes. Si se coloca un líquido en varios vasos comunicantes, la altura que alcanza el líquido es la misma en todos ellos, con independencia de la forma de cada vaso.

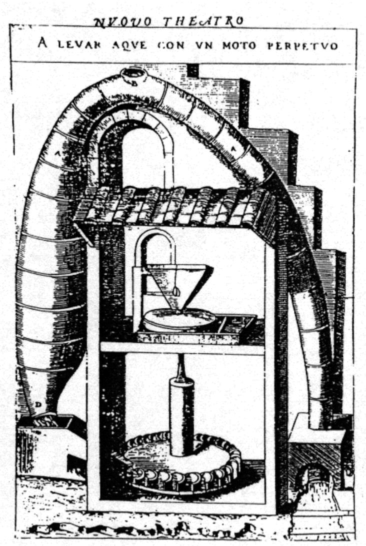

Figura 6: Máquina de Zonca.

Es decir, la presión en un líquido sólo depende de la profundidad y no de la cantidad de agua por encima. Por tanto, en el caso de la máquina de Zonca o no cae agua cuando se abre el tubo mayor, o si cae, el tubo menor no la repone en absoluto y también él se vacía.

Algunas variantes con respecto a la máquina de Zonca son las máquinas de flotadores. En este caso, una serie de flotadores esféricos suben dentro de un tanque de agua, al llegar arriba caen por una rampa y mueven una cinta sin fin, que está en contacto con el tanque, donde vuelve a depositar el flotador cuando ha llegado a su parte más baja. Entonces vuelve a subir por flotación por el tubo de agua y el proceso se repite. Una variante es el móvil perpetuo hidráulico de Gotz, que utiliza no uno sino dos líquidos, uno más denso que el otro. Como ahora las alturas alcanzadas por cada líquido son distintas, Gotz pensó que esta nueva situación le permitiría obtener trabajo. Lamentablemente, en todos los casos las bolas se resisten a entrar en el líquido una vez lo han abandonado y a cerrar el ciclo.

Máquinas de capilaridad y afines.

La capilaridad siempre ha sido una buena candidata para la construcción de móviles perpetuos. Si en un líquido que moje el vidrio se introduce un pequeño tubo capilar, el líquido asciende por el capilar hasta una cierta altura característica, que depende tanto de las propiedades (viscosidad, densidad, temperatura, etc) del líquido como del radio del capilar. Esta creación de una cierta diferencia de alturas en un líquido, aunque sea en el modesto volumen de un capilar, parece una ocasión propicia para la construcción de una máquina que lo utilize.

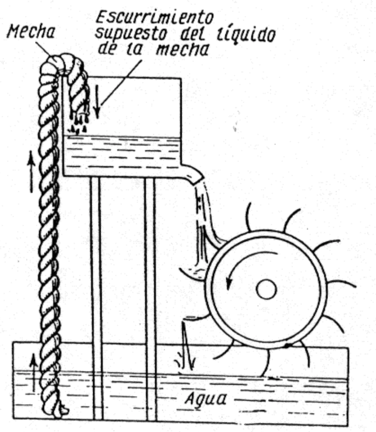

Figura 7: Móvil perpetuo de capilar de mecha. (V. M. Brodianski, *Móvil perpetuo antes y ahora*, Ed. Mir, Moscú (1989)).

En efecto, se puede intentar razonar de la siguiente manera. Supóngase que para un montaje dado, el líquido alcanza una altura h en el capilar. Si a una cierta altura $h' < h$ se produce un corte, parece razonable pensar que, o bien el líquido superior abandonará la parte superior del capilar, o bien que el líquido de la parte inferior del corte empezará a fluir. O de forma más sencilla. En vez de un capilar de altura h se introduce un capilar de altura h' y el líquido que intenta ascender hasta la altura h, se encuentra con el corte, rebosa se recoge a esa altura h' y vuelve a la cubeta produciendo un trabajo.

Sin embargo, tal cosa no sucede. Si se introduce un capilar de menor longitud que la altura que el líquido puede alcanzar en un capilar de esas características, el líquido llega hasta la parte superior y se para, no rebosa. El fenómeno de la capilaridad está relacionado con las interacciones mútuas entre las moléculas del líquido y las del vidrio, compitiendo con las interacciones de las moléculas del líquido entre sí y del vidrio entre sí. Si el líquido moja (caso del agua y el vidrio) estas interacciones dan lugar a diferencias de presión, que se compensan ascendiendo la columna de líquido en el capilar.

Esta idea del capilar se aplica en el móvil perpetuo de capilar de mecha. La capilaridad (un fenómeno directamente relacionado con la tensión superficial del líquido) permite que el líquido suba por la mecha. Pero desgraciadamente, las mismas fuerzas que le hacen subir le impiden escurrir, con lo que el ciclo no se cierra.

Una interesante variante de esta clase de móviles perpetuos es el móvil perpetuo osmótico propuesto por Juan Bernoulli. Como es bien conocido cuando una cierta solución salina (agua más sal), cerrada por una membrana semipermeable, es introducida en una cubeta con agua pura, el nivel de la solución salina aumenta con respecto al inicial y con respecto al nivel del agua pura. De nuevo se tiene una situación en la que un líquido logra elevar su altura respecto de uno circundante.

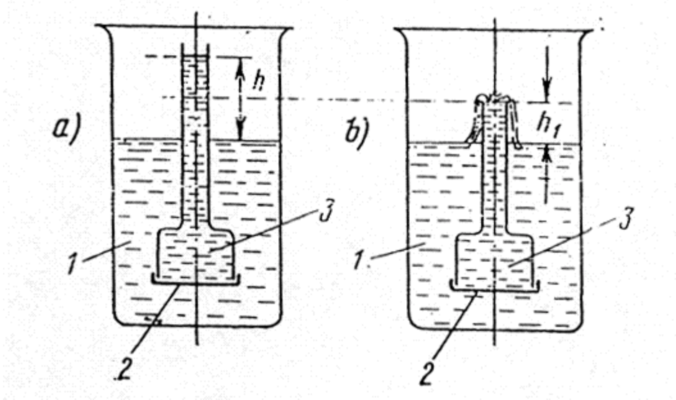

Figura 8: Móvil perpetuo osmótico de Juan Bernoulli. (V. M. Brodianski, *Móvil perpetuo antes y ahora*, Ed. Mir, Moscú (1989)).

En este caso la propuesta de Bernoulli fue las misma que en el caso anterior. Si en la solución de agua con sal el líquido alcanza una altura h, córtese el tubo a una altura $h' < h$ y se tendrá que el agua rebosará. El agua puede caer a la cubeta realizando un trabajo. El empuje del agua pura volverá a intentar elevar la columna y se tendrá así un móvil perpetuo.

Aunque la propuesta es ingeniosa, y de hecho funcionará al principio, a diferencia de los móviles de capilaridad, no es viable. La clave del asunto es que lo que se vierte a través del tubo osmótico no es agua pura sino una mezcla de agua con sal. Al principio el líquido en efecto rebosará, pero en la cubeta el agua pura se sala ligeramente y en el tubo osmótico entra agua pura que disminuye la concentración de la solución salada. A medida que el proceso continúa, el agua de la cubeta cada vez está más salada y el agua del tubo osmótico cada vez lo está menos. Cuando ambas concentraciones se igualen, el flujo de agua cesará y el móvil se parará. Desde un punto de vista Termodinámico se tiene una situación inicial de no equilibrio químico, pues los potenciales químicos del soluto son distintos en cada solución. Al eliminar la ligadura que impide que se alcance el equilibrio, el sistema evoluciona hasta que el equilibrio se alcanza. De la situación inicial de no equilibrio se puede obtener algo de trabajo, que a su vez puede relacionarse con el agua elevada.

Otra variante es la denominada máquina de esponjas. En un plano inclinado colocado sobre una cubeta con agua se forma una cadena de esponjas, encima de las cuales se coloca otra cadena adicional de pesos sobre ellas. Las esponjas absorben agua por capilaridad, se empapan y pesan más. Segun suben el plano inclinado, los pesos colocados encima de ellas las exprimen. Las esponjas del otro lado que están empapadas pesan más y tiran de ellas, subiéndolas. Desgraciadamente, por alguna razón, esta máquina no funciona tampoco.

Máquinas con el rodillo de Arquímedes.

Además de las máquinas sencillas anteriores, se han propuesto máquinas muy complejas para lograr el movimiento perpetuo. Una interesante combinación son las máquinas que utilizan una cierta caida de agua junto con un rodillo de Arquímedes. El rodillo de Arquímedes es una curva helicoidal encerrada en un tubo, aunque también puede ser un tubo enroscado en forma helicoidal alrededor de un cilindro. Este dispositivo, dotándole de un movimiento giratorio, permite elevar un líquido una cierta altura, tanto mayor cuando mayor sea la longitud del cilindro y del tubo. Dicho dispositivo se utiliza en la actualidad en paises como Egipto para elevar agua de unas terrazas a otras situadas a poca altura, siendo movidos generalmente por caballerías .

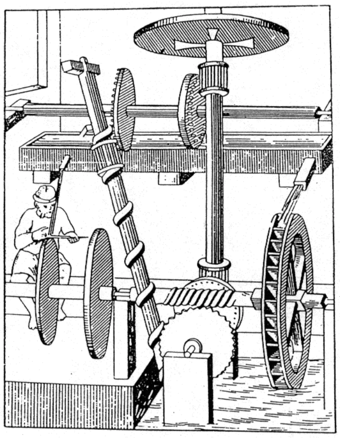

Figura 9: Móvil perpetuo hidráulico. (V. M. Brodianski, *Móvil perpetuo antes y ahora*, Ed. Mir, Moscú (1989)).

La idea es entonces ensamblar dos máquinas para lograr el móvil perpetuo. Una cierta cantidad de agua cae sobre una rueda y hace que esta gire. Este movimiento se utiliza en parte para mover una rueda de molino, una rueda de afilar, o cualquier otro dispositivo, y en parte para hacer girar un tornillo de Aquímedes que permita subir el agua desde el nivel más bajo al nivel más alto, desde donde el proceso volverá a repetirse.

Aunque nada de la energía producida por el agua al caer se perdiese en forma de calor por el rozamiento, el Principio de Conservación de la Energía impide que tal proceso cíclico tenga lugar. El agua al caer perdería más energía potencial que la que luego se necesitaría para elevarla, lo que no está permitido.

Para terminar esta parte comentar brevemente el caso de un móvil perpetuo con una historia curiosa. Se trata de la máquina de Orfirius, del siglo XVIII, cuyo verdadero nombre era Besler, variante extraordinariamente compleja de un móvil perpetuo. Se trataba de una construcción conscientemente complicada para dar sensación de poderío y potencia y que al mismo tiempo elevaba un peso a considerable altura. Alguna versión de esta máquina fue vendida a algún principe de la época y se utilizaba para diversión más que para realizar el trabajo para el que estaba diseñada. Lo complejo de su construcción y la

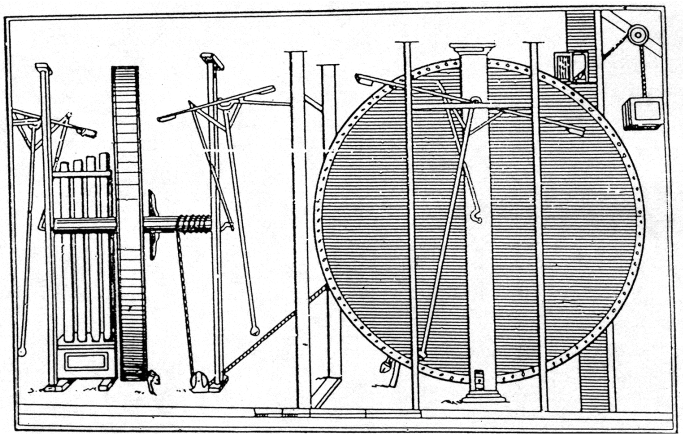

Figura 10: Máquina de Orfirius

evidencia de su movimiento constante llevó al científico Schumacher a decir que *es segura, ya nadie puede difamarla, sino es con mala intención, porque el mundo está lleno de gentes malas, de las cuales no es posible creer nada.*

Desgraciadamente para Besler, una desavenencia familiar con su esposa, sobre el reparto de los beneficios que la exhibición de la máquina proporcionaban, puso el secreto al descubierto. El motor estaba movido desde una habitación contigua por personal ocultas, el hermano del inventor y su sirvienta.

Máquina de Escher .

Una variante realmente imaginativa sobre un móvil perpetuo es el caso de la máquina de Escher, basada en una versión artística modificada del Triángulo de Penrose. Mediante un esquema paradójico, el agua en su caida mueve una rueda de molino y mediante una canalización adecuada vuelve a ascender. La elegancia del dibujo la hace perfectamente verosimil.

Es interesante destacar que si todas estas máquinas MPPE llegasen a funcionar a la inversa, girando en el sentido contrario al del diseño, se trataría de Destructores de Energía Perpetuos de Primera Especie, lo que tampoco parece posible.

4 Móviles Perpetuos de Segunda Especie.

A diferencia de los Móviles Perpetuos de Primera Especie, los Móviles Perpetuos de Segunda Especie no funcionan obteniendo energía a partir de la nada sino transformando energía en forma de calor (o energía interna) en energía mecánica, sin un coste adicional en forma de entropía. De una manera más técnica, los MPSE logran transformaciones energética en las cuales se cumple el Principio de Conservación de la Energía, pero no el Principio de Aumento de la Entropía. Serían por tanto Disminuidores Perpetuos de la Entropía del Universo, lo que no parece posible. De nuevo aquí hay que llamar la atención sobre el caracter cíclico que deben tener estas máquinas, pues de no ser así, es posible que se presenten móviles que parecen perpetuos, pero que no lo son.

El interés de estos MPSE estriba en que su imposibilidad puede proporcionar interesante información sobre los sistemas y en su caso obligar a introducir nuevos conceptos que restablezcan el Principio de Aumento de la Entropía.

Uno de los móviles perpetuos más curiosos es el formado por una combinación de una máquina de Carnot y otra máquina con menor rendimiento que esta. Parece que cominando adecuadamente las máquinas, se puede lograr un móvil perpetuo de segunda especie. La falacia se encuentra en la suposición de que una máquina no reversible tiene la misma efectividad como máquina térmica que como frigorifico, lo que no es cierto.

Problema ??.2. *Transformación íntegra de calor en trabajo*

Existen muchos gases cuya energía interna es función únicamente de la temperatura, $U = U(T)$. En una expansión isotérmica reversible, se absorbe calor de un foco y se convierte *íntegramente* en trabajo. Demuéstrese que esto es cierto. ¿Constituye este fenómeno una violación del Segundo Principio?

Respuesta

De acuerdo con el Primer Principio, en un proceso isotermo el trabajo es igual a

$$-W = -\int_{V_i}^{V_f} \left(\frac{\partial U}{\partial V}\right)_T \mathrm{d}V + Q\,. \qquad (1)$$

Por tanto, si $U = U(T)$, se tiene que $-W = Q$, de tal forma que si se absorbe calor $Q > 0$, el sistema lo transforma *íntegramente* en trabajo $W < 0$.

Esta transformación íntegra del calor en trabajo no supone una violación del Segundo Principio, pues el Enunciado de Kelvin–Planck exige que no se pueda transformar íntegramente el calor absorbido en trabajo, *en procesos cíclicos realizados por el sistema.* Puesto que el sistema correspondiente no realiza un proceso cíclico, no hay ninguna contradicción con el Segundo Principio.

Supóngase ahora que una hipotética sustancia, con una ecuación térmica de estado muy complicada, pudiera tener un comportamiento como el presentado en la Fig. 11(a), con una isoterma y una adiabática que se cruzan en dos puntos. El Enunciado de Kelvin–Planck permite demostrar que dicho comportamiento no es posible.

Si tal pudiera suceder (Ejemplo **??**.3.), se puede llevar a cabo un proceso cíclico, Fig. 11(b), en el que se obtiene trabajo en contacto con sólo un foco de calor. Semejante máquina sería un móvil perpetuo de segunda especie. Se concluye así que la premisa de partida no es correcta y que, por complicada que pueda ser la ecuación térmica de estado, esta situación no puede darse.

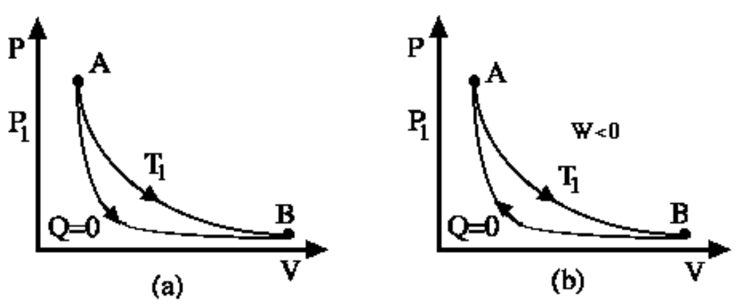

Figura 11: (a) Isoterma y adiabática de una sustancia hipotética. (b) Ciclo formado por la isoterma y la adiabática anteriores.

Diablillos de Maxwell.

Los diablillos de Maxwell son los primeros MPSE descritos y hoy día siguen siendo objeto de curiosidad científica.

El más conocido de estos diablillos de Maxwell (y que fue el originalmente considerado por Maxwell) es el denominado *diablillo de temperatura*. Se tiene esencialmente un sistema gaseoso, típicamente un gas encerrado en un recipiente, dividido en dos partes mediante una trampilla que se puede abrir y cerrar a voluntad y sin gasto de energía. Todo el sistema se encuentra a la misma temperatura T, en contacto con un foco de calor, y no se dispone de ningún otro foco a temperatura diferente de T. De acuerdo con la formulación de Kelvin-Planck del Segundo Prinvcipio de la Termodinámica, es imposible obtener trabajo mecánico en procesos cíclicos a partir de ese único foco a temperatura T. Es decir, no existe ninguna máquina que después de realizar un ciclo completo haya logrado disminuir la energía interna de ese foco, sin ningún otro cambio.

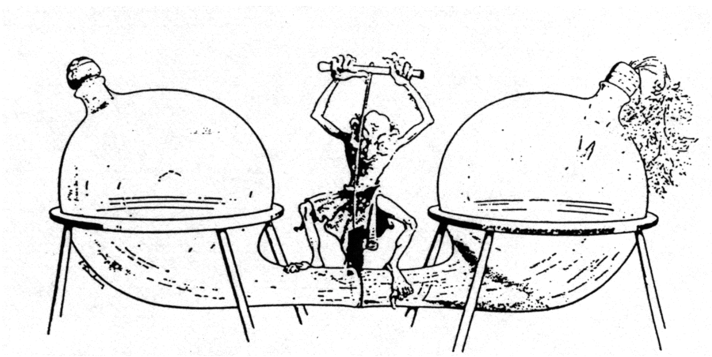

Figura 12: Una versión artística del diablillo de Maxwell.

De acuerdo con la distribución de velocidades de Maxwell-Boltzmann, aunque el gas se encuentra a una temperatura uniforme, no todas las moléculas del gas tienen la misma velocidad. Esta circunstancia puede ser utilizada en principio para obtener algo de trabajo. El razonamiento seguido por Maxwell es el siguiente. El diablillo conoce todas las posiciones y velocidades de las partículas. El gas se separa del foco a temperatura T y se convierte momentáneamente en un sistema aislado. Cuando en el lado derecho del gas ve acercarse a la trampilla una cierta partícula, con velocidad superior a la media, abre la trampilla y deja que pase al lado izquierdo. Del mismo modo cuando en el lado izquierdo ve venir hacia la trampilla una partícula a velocidad menor que la media, abre la trampilla y deja que pase al lado derecho. De esta forma, el diablillo va logrando que en el lado izquierdo se vayan concentrando las partículas más rápidas, que es lo mismo coloquialmente que decir más calientes, y en el lado derecho se vayan concentrando las partículas más lentas, es decir las más frías, hasta lograr que exista una diferencia de temperaturas entre el lado derecho y el lado izquierdo. Cuando esta separación se ha logrado, de acuerdo con la Termodinámica, se tiene una situación de no equilibrio, no equilibrio térmico, a partir de la cual se puede obtener algo de trabajo. Así, se conecta alguna clase de máquina térmica entre ambos susbsistemas a diferentes temperaturas, se obtiene algo de trabajo y se alcanza el equilibrio cuando el gas alcanza una temperatura menor $T' < T$. Ahora, para cerrar el ciclo se conecta de nuevo el gas con el foco a temperatura T, el gas aumenta su temperatura hasta T y aparentemente se ha vuelto a la situación inicial. El gas realizó un ciclo, la máquina térmica utilizada también realiza ciclos y, por tanto, parece que se ha logrado obtener algo de trabajo a partir de un sólo foco de calor y realizando procesos cíclicos. Es decir, parece que se ha logrado disminuir la entropía del Universo.

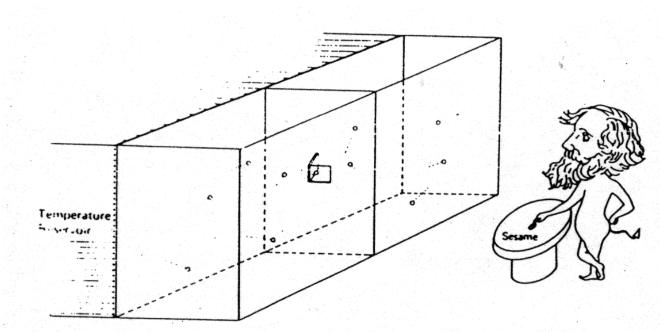

Figura 13: Una versión artística del diablillo de Maxwell con la cara del propio Maxwell.

Aunque a esta clase de razonamientos se le pueden poner algunas objeciones, es posible demostrar que se puede manipular la trampilla sin casi gasto de energía y que incluso el diablillo puede llegar a saber dónde se encuentran las partículas también casi sin gasto de energía. En opinión de algunos autores, en todo lo descrito en el caso anterior, no se ha producido un proceso cíclico. En efecto, para volver a la situación inicial, también el diablillo debe volver a su situación inicial, lo que exige que borre de sus memorias las posiciones y velocidades de todas las partículas y escriba las nuevas posiciones y velocidades. Es entonces cuando todo vuelve realmente a la situación inicial y se cierra el proceso cíclico. Y en opinión de estos autores, es este proceso de borrado de memorias el que produce el correspondiente aumento de la entropía que compensa la aparente disminución inicial. Es decir, esta máquina es en principio posible, pero en el mejor de los casos no se obtiene trabajo neto, y en todos los demas hay una transformación de trabajo mecánico, o electrónico, en calor con el correspondiente aumento de la entropía del Universo.

Una modificación respecto de este diablillo es el denominado *diablillo de Maxwell de presión*. El razonamiento es muy semejante al anterior, pero ahora se trata de que cuando el diablillo ve que se acerca una (o mas moléculas) a la tranpilla desde el lado derecho, mientras que por el lado izquierdo no se acerca ninguna, abre la trampilla y deja que esta pase al lado izquierdo. Procediendo de esta manera va logrando concentrar las partículas en el lado izquierdo y enrareciendo el lado derecho, hasta producir una diferencia de presiones entre uno y otro lado. De nuevo esta situación de no equilibrio termodinámico, no equilibrio mecánico en este caso, se puede utilizar para obtener algo de trabajo utilizando alguna máquina térmica. Después de obtener trabajo, el gas estará a menor temperatura $T' < T$ y poniéndolo de nuevo en contacto con el foco, volverá a su temperatura inicial.

En este caso se pueden aplicar los razonamientos anteriores. Algunos autores (de hecho este fue uno de los primeros diablillos estudiados matemáticamente) propusieron que es en el proceso de obtención de la información sobre donde se encuentran las partículas, información necesaria para hacer funcionar este dispositivo, donde se produce el correspondiente gasto de energía y el correspondiente aumento de entropía. Esta clase de razonamientos son el origen de la *Teoría de la Información* que asigna gastos energéticos y variaciones de entropía a la obtenciómn y manipulación de la información.

Además, en el caso del diablillo de presión, a medida que las partículas se van concentrando en una mitad resulta más y más difícil cumplir la condición de que una partícula de la derecha se dirija hacia la trampilla y ninguna de la izquierda vaya hacia la trampilla. Para mejorar sus posibilidades, el diablillo debe ser capaz de abrir cada vez más rápidamente la trampilla. Pero si se pone un límite en la velocidad de la luz la rapidez con que el diablillo puede abrir la trampilla, el número de partículas que puede manipular es muy pequeño y las posibles disminuciones de entropía por este concepto son inapreciables.

En definitiva, la convicción de que esta clase de móviles no eran posibles llevó a una ampliación de la Termodinámica y a la necesidad de asignar un coste entrópico a la obtención y manipulación de la información, algo que la Termodinámica clásica no había tenido en cuenta.

Como a pesar de todo existen las fluctuaciones en los sistemas termodinámicos, debido a la composición atómica y molecular de la materia, se han propuesto MPSE basados en la utilización de estas fluctuaciones. Por ejemplo, a partir del Movimiento Browniano. Una partícula sólida, por ejemplo un grano de polen, suspendida en una disolución líquida, por ejemplo agua, ejecuta un movimiento errático conocido como movimiento browniano. Puesto que la partícula se mueve efectivamente, puede parecer que tales movimientos se pueden utilizar para producir trabajo. Sin embargo, sucede lo mismo que en el caso anterior y es preciso tener un conocimiento detallado sobre las fluctuaciones (y no sólo un conocimiento estadístico) para obtener algún beneficio. En promedio, las partículas no se mueven del origen, con lo que no hay ningún desplazamiento global que pueda utilizarse.

Más sobre la presión osmótica.

Al igual que el fenómeno de la presión osmótica sugirió un MPPE, también sugirió un MPSE. El razonamiento es más o menos el siguiente. Supóngase que en una cubeta con un líquido puro se introduce un tubo cerrado por una membrana semipermeable que contiene una cierta disolución de ese líquido, por ejemplo una cierta cantidad de azucar disuelta en el líquido. En este caso, la columna de disolución alcanza una altura h. Ahora, a diferencia del caso anterior, todo el conjunto se encierra en una campana de cristal, de tal forma que se tiene un sistema cerrado.

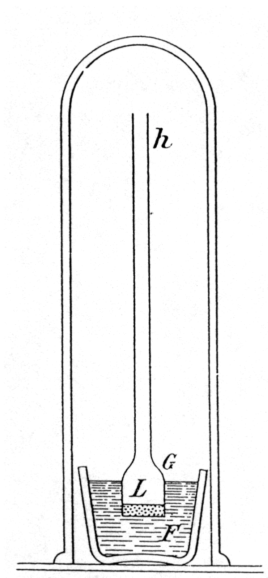

Figura 14: Descenso de la presión de vapor.

La forma de razonar es ahora la siguiente. Cuando se haya alcanzado un cierto equilibrio entre el líquido y su vapor en toda la campana, se tendrá que el líquido colocado en la superficie de la cubeta está en equilibrio con su vapor. Es decir, la presión de vapor del líquido en la superficie de la cubeta es la misma que la presión del vapor encerrado en la campana. Pero, puesto que el líquido colocado dentro del tubo osmótico está, al menos la parte superior, a una altura h sobre la superficie de la cubeta, la presión de vapor sobre el líquido de la parte superior del tubo osmótico es menor que la presión de vapor sobre el líquido de la superficie de la cubeta. Pero como se ha concluído que el líquido de la cubeta y su vapor están en equilibrio, el líquido de la parte superior del tubo osmótico no está en equilibrio con su vapor. Y puesto que no está en equilibrio, algo del líquido (ahora sólo líquido a diferencia del MPPS descrito anteriormente) del tubo osmótico debe evaporarse, para ir después a condensarse sobre la superficie del líquido de la cubeta. Al bajar la presión osmótica por efecto de dicha evaporación, algo de líquido puro vuelve a atravesar la membrana semipermeable y el proceso se vuelve a repetir. Se tiene así una circulación constante del líquido dentro de la campana, lo que en principio podría utilizarse para obtener algo de trabajo y diseñar un MPSE.

Ahora se puede contraargumentar de la manera siguiente. En el razonamiento anterior se ha hecho la suposición implícita de que la presión de vapor de un líquido puro (el líquido en la cubeta) es la misma, a una temperatura T, que la presión de vapor del mismo líquido en el que hay una determinada concentración de soluto. Por tanto, y puesto que tal MPSE no puede funcionar, debe existir una relación entre la presión de vapor del líquido que contiene el soluto, la presión de vapor del líquido puro y la diferencia de presiones entre la superficie de la cubeta y la parte superior del tubo osmótico. Pero esta diferencia de presiones está a su vez relacionada con la altura h (que a su vez está relacionada con la presión osmótica $Pi = \rho_L RT$), con la densidad del vapor del líquido ρ_V y con la atracción de la gravedad g.

Manipulando todas estas variables se establece una relación entre la presión de vapor de una disolución y la presión de vapor del líquido puro. Se encuentra que al aumentar la concentración de una disolución, a la misma temperatura, la presión de vapor disminuye, por lo que para alcanzar una determinada presión de vapor, la temperatura debe aumentar respecto del líquido puro. Así, para alcanzar el punto de ebullición de una disolución azucara de agua, la temperatura debe ser mayor de 100 °C bajo la misma presión de 760 mmHg.

Motor de Gemgi.

El hecho de que los gases reales se enfrían cuando se expanden ha llevado a algunos inventores a conjeturar sobre la posibilidad de contruir un motor que además se comporte como un frigorífico, obteniéndose un doble beneficio.

En concreto, Gemgi utiliza un motor de amoníaco líquido, que bajo presión de 1 atm hierve a 27 °C. Así, en una caldera con amoníaco líquido en equilibrio con su vapor a la temperatura ambiente se impone una presión superior a la atmosférica, para lograr que el amoníaco siga líquido. Se abre entonces una válvula que permite que el amoníaco se expanda contra presión atmosférica (menor), realizando un cierto trabajo contra un émbolo. En este proceso de expansión el amoníaco se enfría e incluso se licúa parcialmente. A continuación, el amoníaco pasa a una bomba, que utiliza parte del trabajo realizado por el amoníaco en su expansión, donde se vuelve a elevar su presión hasta la que tiene en la caldera. Entonces se devuelve a la caldera y en esta absorbe una cierta cantidad de calor del entorno que devuelve al amoníaco a su temperatura inicial. Es decir, merced a la propiedad del amoníaco de licuarse a temperaturas menores que las normales y merced al hecho de que los gases se enfrían cuando se expanden, parece que se puede lograr un móvil perpetuo que únicamente obtiene calor de un solo foco, el formado por el ambiente. Se trata por tanto de un supuesto MPSE. Y en efecto, en cada ciclo una cierta cantidad de entropía Q/T donde Q es el calor cedido a la caldera y T es la temperatura ambiente, desaparece literalmente, pues todo ese calor es transformado en trabajo.

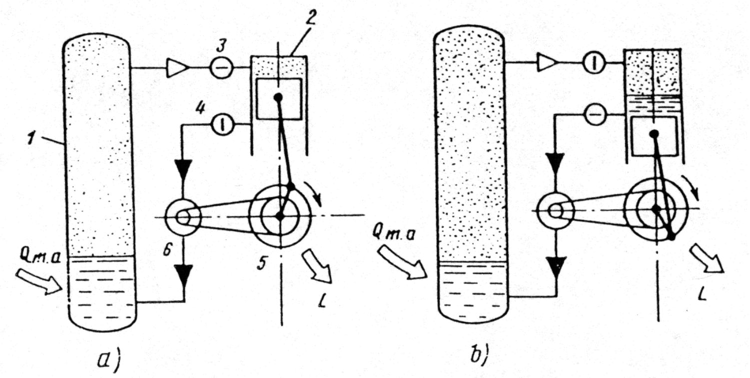

Figura 15: Motor de Gemgi. (V. M. Brodianski, *Móvil perpetuo antes y ahora*, Ed. Mir, Moscú (1989)).

Una forma sencilla de ver por qué no puede funcionar este motor es construir un diagrama $P-V$ de los supuestos procesos. Imagínese que se empieza en un cierto punto a temperatura de 27 °C. Por ese punto pasará una cierta línea adiabática reversible, el conjunto de estados que pueden ser alcanzados a partir de ese por vía reversible y adiabática. Puesto que el proceso de expansión contra la presión atmosférica no es un proceso reversible el proceso real debe discurrir por encima de la adiabática de 27 °C. Esto significa que cuando el gas alcance la temperatura de -23 °C, el volumen ha tenido que aumentar. Si ahora se quiere volver a comprimir el gas y se debe hacer adiabáticamente pues sólo se dispone del foco a la temperatura ambiente de 27 °C, se puede hacer por la adiabática que pasa por el punto a -23 °C realizando procesos reversibles. Al llegar a 27 °C se puede seguir comprimiendo isotérmicamente hasta alcanzar el volumen original. Se cierra así el ciclo. El único problema es que en este ciclo es mayor el trabajo de compresión que hay que realizar que el trabajo de expansión obtenido y en la caldera de amoníaco no se absorbe calor del ambiente sino que se cede calor al ambiente (ver el diagrama $T-S$ correspondiente) y la entropía del universo no disminuye sino que aumenta, lo que demuestra que en el proceso de expansión entre la alta presión del amoníaco y la presión atmosférica se ha producido un proceso irreversible. La máquina funciona no como un Destructor Perpetuo de la Entropía del Universo sino como un Aumentador Perpetuo de la Entropía del Universo, lo que está perfectamente permitido.

Móvil basado en un Agujero Negro.

Como es relativamente bien conocido, una gran cantidad de masa colapsandose bajo la presión de su propia gravedad se puede convertir en un objeto tan denso que la velocidad de escape del mismo sea muy grande. Si la velocidad de escape se llegara a hacer igual a la velocidad de la luz, ni siquiera la luz podría abandonar el objeto y este se haría virtualmente invisible, convirtiéndose en un agujero negro. Para un sistema más y más colapsado, hasta convertirse virtualmente en un punto, existiría una cierta superficie esférica a su alrededor por debajo de la cual ni la luz podría escapar. Estar superficie virtual se denomina *horizonte de sucesos del agujero negro* y juega un papel importante en su descripción y estudio.

Cuando se comenzarón a describir los agujeros negros, una importante característica se puso enseguida de manifiesto. Si los agujeros negros absorbían toda la radiación y no dejaban escapar ninguna radiación, desde un punto de vista termodinámico se comportaban como objetos a la temperatura del cero absoluto. Si esta característica era correcta, entonces se podían utilizar como móviles perpetuos de segunda o de tercera especie. Es decir, se podían imaginar mecanismos por los cuales, utilizando el agujero negro, se transformase en procesos cíclicos una cierta cantidad de calor íntegramente

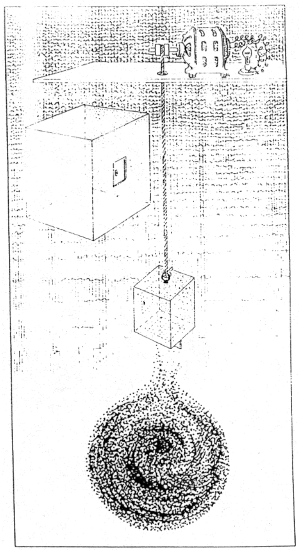

Figura 16: Máquina de Geroch.

en trabajo mecánico. Ver la Fig.4.

Una máquina de este tipo fue rápidamente imaginada por Robert Geroch. La idea era la siguiente. Una caja situada a una cierta distancia del agujero negro se abría y se llenaba con la radiación existe en ese entorno, radiación en equilibrio a una cierta temperatura T, que se puede imaginar tan alta como se quiera. Una vez llena la caja de radiación, se utilizaba la atracción del agujero negro para obtener una cierta cantidad de trabajo. Cuando la caja llegaba al horizonte de sucesos del agujero negro, límite por debajo del cual nada escaparía a su atracción, ni siquiera la radiación, esta se abría. Entonces, toda la radiación era absorbida por el agujero negro. En el proceso de recuperación de la caja, el trabajo necesario para volverla a su posición inicial era algo menor que el trabajo obtenido con anterioridad. Una vez en su posición inicial el proceso se podía volver a repetir.

Desde este punto de vista, un agujero negro se comporta como un cuerpo negro (una cavidad mantenida a una cierta temperatura, como puede ser un horno) a temperatura absoluta de 0 K, pues no emite nada de radiacción y sin embargo la absorbe toda. Hasta aquí nada que objetar desde el punto de vista termodinámico, que en principio impide que se alcance el cero absoluto, pero no que un sistema se encuentre ya en el cero absoluto. (Ver más adelante, donde se trata el caso del agua a 4 °C).

Y si está a 0 K, su entropía ha de ser también cero. Pero si su entropía es cero, se puede lograr disminuir la entropía del Universo sin más que lanzar a su interior una cierta cantidad de materia que tenga una alta entropía. Por otra parte, y por consideraciones de otro tipo, mecánico estadísticas, se tiene que la entropía no sólo no debe ser cero sino que debe ser enorme. [Si la entropía ha de medir aproximadamente el número de diferentes maneras en que se puede obtener el agujero negro a partir de sus constituyentes, lo que es una interpretación mecanico-estadística, esta ha de ser enorme. Por otro lado, la información que se pierde en la formación del agujero negro contrasta fuertemente con la información que se tiene de un sistema perfectamente ordenado a 0 K. Si entropía e información son magnitudes complementarias, la entropía debe ser muy grande para un sistema del que se ignora casi todo.]

Por otra parte, esta tendencia a absorber todo lo que se acerque a su horizonte de sucesos, permite ir en contra del Segundo Principio, o al menos eliminar gran parte de su poder de predicción. Así, si una criatura, denominada *diablillo de Wheeler*, podría tomar un sistema con cierta entropía, alta, y depositarlo en un agujero negro, haciéndolo invisible desde el exterior. La entropía habría disminuido en el exterior, la masa total se conservaría, y el hipotético observador no podría estar seguro de que la entropía del Universo no habría disminuido.

En definitiva, parece estar en contradicción con el Segundo Principio de la Termodinámica la suposición de que un agujero negro se encuentra en el cero absoluto. Pero si no se encuentra en el cero absoluto, debe radiar algo de energía, lo que, a primera vista, parece estar en contradicción con el propio caracter del agujero negro. Se trata entonces de saber por qué la máquina descrita por Geroch no puede funcionar. Para responder a esta pregunta hizo falta combinar la termodinámica, la mecánica cuántica y la relatividad general. Sin entrar en demasiados detalles, Hawking encontró que en las proximidades del horizonte de sucesos del agujero negro se pueden producir una serie de fenómenos cuánticos (las fluctuaciones del vacío) que dan lugar a que parezca que el agujero negro emite realmente radiación. Y la distribución energética de esta radiación es la que le correspondería a un sistema cuya entropía estuviera relacionada con la superficie de su horizonte de sucesos. Es decir, por toda una serie de consideraciones técnicas se encontró que la superficie del horizonte de sucesos tiene propiedades semejantes a las de la entropía. Como el agujero negro tiene energía asociada a su masa, la termodinámica permite que se le asignen temperaturas. Y si un sistema tiene una temperatura, radia como un cuerpo negro a esa temperatura, con una distribución de Planck característica. Esta distribución y esa temperatura fueron realmente encontradas por Hawking, que enunció así el teorema de que los agujeros negros son en realidad grises.

Y esto completa la historia. Los agujeros negros caen también dentro del dominio de la termodinámica y no se pueden contruir MPSE utilizándolos. La imposibilidad de construir tales máquinas llevó a una descripción y caracterización de los agujeros negros muy diferente de las inicialmente imaginadas.

Un ciclo simple que es un MPSE.

Ejemplo ??.7. *Un ciclo más complicado de lo que parece*

Descripción del ciclo. Una máquina térmica reversible opera con un mol de un gas ideal monoatómico siguiendo el ciclo de la Fig. 17, que consta de una línea recta de ecuación $P = aV + b$ (ver Problema ??.2.) y de una curva isoentrópica.

Para calcular el rendimiento de este ciclo se puede razonar de la siguiente manera: El trabajo total en el ciclo es

$$W_T = -\int_{\mathrm{A(Recta)}}^{B} P\,\mathrm{d}V - \int_{\mathrm{B(Adiab)}}^{A} P\,\mathrm{d}V\,.$$

En la línea AB, se tiene

$$W_{\mathrm{AB}} = -\int_{\mathrm{A(Recta)}}^{\mathrm{B}} (aV+b)\,\mathrm{d}V = \frac{a}{2}\left(V_{\mathrm{A}}^2 - V_{\mathrm{B}}^2\right) + b\,(V_{\mathrm{A}} - V_{\mathrm{B}}) < 0\,.$$

Dado que entre BA se tiene un proceso adiabático reversible, con $c_V = 3R/2$, $PV = N\,R\,T$ y $c_P = c_V + R$, se tiene

$$W_{\mathrm{BA}} = -\int_{\mathrm{B(Ad)}}^{A} P\mathrm{d}V = \Delta U = c_V(T_{\mathrm{A}} - T_{\mathrm{B}}) = \frac{c_V}{R}\left[a\left(V_{\mathrm{A}}^2 - V_{\mathrm{B}}^2\right) + b\,(V_{\mathrm{A}} - V_{\mathrm{B}})\right] > 0$$

y el trabajo neto obtenido en el ciclo es

$$W_{\mathrm{N}} = -W_{\mathrm{T}} = -\left[a\left(\frac{c_V}{R} + \frac{1}{2}\right)\left(V_{\mathrm{A}}^2 - V_{\mathrm{B}}^2\right) + \left(\frac{c_V}{R} + 1\right) b\,(V_{\mathrm{A}} - V_{\mathrm{B}})\right]\,.$$

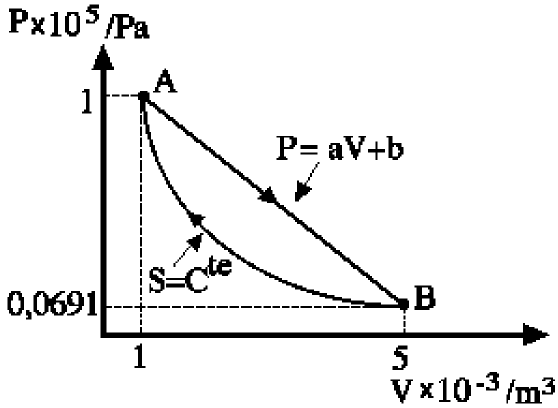

Figura 17: Ciclo formado por una recta $P = aV + b$ y una isoentrópica para un gas de ecuación térmica de estado $PV = RT$ y $C_V = 3R/2$.

Por otra parte, el calor intercambiado en AB es $Q_{\mathrm{AB}} = \Delta U_{\mathrm{AB}} - W_{\mathrm{AB}}$. Pero tratándose de un gas ideal, se tiene $\Delta U_{\mathrm{AB}} = C_V(T_{\mathrm{B}} - T_{\mathrm{A}})$ y, por tanto,

$$Q_{\mathrm{AB}} = -\left[a\left(\frac{c_V}{R} + \frac{1}{2}\right)\left(V_{\mathrm{A}}^2 - V_{\mathrm{B}}^2\right) + \left(\frac{c_V}{R} + 1\right) b\left(V_{\mathrm{A}} - V_{\mathrm{B}}\right)\right],$$

que coincide con el trabajo neto realizado en el ciclo.

Como $Q_{\mathrm{BA}} = 0$ (se trata de un proceso adiabático), el rendimiento del ciclo es

$$\eta = -\frac{W_{\mathrm{T}}}{Q_{\mathrm{AB}}} = \frac{W_{\mathrm{N}}}{Q_{\mathrm{AB}}} = 1\,.$$

Este resultado está en clara contradicción con el Segundo Principio [2]. ¿Qué está equivocado en los razonamientos anteriores ?

Solución de la paradoja

En realidad, a lo largo de la línea recta el calor es absorbido hasta un cierto volumen. Después, el sistema cede calor. La línea recta va interceptando isoentrópicas (y también isotermas), aumentando su entropía ($\mathrm{d}S > 0$) (y también su temperatura) y absorbiendo calor ($Q > 0$) hasta alcanzar la máxima entropía (aunque no su máxima temperatura). Entonces ésta comienza a disminuir ($\mathrm{d}S < 0$) y el sistema cede calor ($Q < 0$) (ver Ref. [?]).

[2]Este ciclo se ha denominado de *Sadly Cannot*, haciendo un juego de palabras en inglés con Sadi Carnot, ver Ref. [?].

La situación se aprecia mejor en un diagrama $S-T$ (ver Fig. 18), esquemático del ciclo. La integral para el cálculo del calor da un resultado neto, pues al tratarse de áreas orientadas, la parte negativa se substrae directamente de la positiva y se tiene el calor neto intercambiado, que, obviamente, debe coincidir con el trabajo total producido, de acuerdo con el Principio de Equivalencia entre calor y trabajo. Luego, el problema consiste en calcular la cantidad de calor absorbido, es decir, el calor que realmente debe intervenir en el cálculo del rendimiento del ciclo.

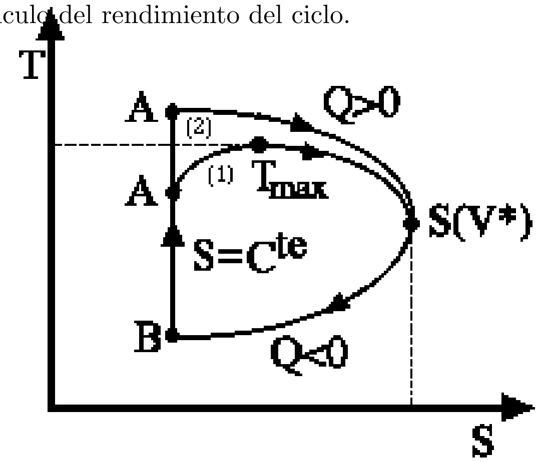

Figura 18: Diagrama $S-T$ del ciclo formado por una recta y una isoentrópica, Fig. 17. (1) Camino con máxima temperatura a lo largo de la línea recta del diagrama $V-P$ de la Fig. 17. (2) Camino con máxima temperatura en A.

El calor es absorbido por el sistema y la entropía de éste aumenta. Por tanto, se debe calcular el volumen V^* para el cual se alcanza el máximo de entropía. Puesto que $S = S_0 + c_V \ln T + R \ln V$, se tiene, a lo largo de la línea recta,

$$S(V) = S_0 + c_V \ln\left(\frac{aV^2 + bV}{R}\right) + R \ln V\,.$$

Imponiendo la condición $[\mathrm{d}S(V)/\mathrm{d}V]_{V=V^*} = 0$, se llega a

$$V^* = -\frac{(c_V + R)\, b}{a\,(2c_V + R)}\,.$$

El calor realmente absorbido es

$$Q^* = \int_{V_i}^{V^*} T\,\mathrm{d}S = \int_{V_i}^{V^*} \frac{aV+b}{R}\left[\frac{c_v\,(2aV+b)}{(aV+b)} + R\right]\mathrm{d}V =$$

$$\frac{1}{R}\int_{V_i}^{V^*} [a(2c_V + R)V + b(c_V + R)]\,\mathrm{d}V$$

y geométricamente se demuestra que $\eta = W/Q^* < 1$. Un cálculo analítico general es difícil, pero se puede llevar a cabo en este caso un cálculo numérico. Por ejemplo, considerando el ciclo de la Fig 17, realizado con un gas ideal monoatómico ($c_V = 3R/2$ y $c_P = 5R/2$), se tiene que la ecuación de la recta AB es $P = -0,233 \times 10^8\,V + 1,233 \times 10^5$ (Pa) y el volumen corespondiente al máximo de entropía es $V^*(S) = 3,308 \times 10^{-3}$ m^3, con $P^*(S) = 0,464 \times 10^5$ Pa y $T^*(S) = 18,5$ K.

Como sobre la adiabática $P(V) = V^{-5/3}$, se tiene que $W_{\mathrm{AB}} = -213$ J, $W_{\mathrm{BA}} = 98,7$ J y $|W_{\mathrm{N}}| = 115$ J.

Puede obtenerse que $Q_{AB} = 115$ J y

$$Q^* = \int_1^{V^*} T\,\mathrm{d}S = \int_{1\times10^{-3}}^{3,3\times10^{-3}} \left[4arV + \frac{5}{2}b\right]\mathrm{d}V = 248 \text{ J}\,,$$

de donde

$$\eta = \frac{2a(V_{\mathrm{B}}^2 - V_{\mathrm{A}}^2) + \frac{5}{2}b(V_{\mathrm{B}} - V_{\mathrm{A}})}{2a(V_{S^*}^2 - V_{\mathrm{A}}^2) + \frac{5}{2}b(V_{S^*} - V_{\mathrm{A}})} = 0,463\,.$$

Las temperaturas en A y B son $T(A) = 12,19$ K y $T(B) = 4,21$ K, por lo que un ciclo de Carnot entre estas temperaturas tendría un rendimiento $\eta_C = 1 - 4,21/12,19 = 0,655$ mayor que el del anterior ciclo.

La máxima temperatura a lo largo del ciclo se obtiene imponiendo la condición de máximo a $T = (aV^2 + bV)/R$, de donde se obtiene que el volumen al que se tiene la máxima temperatura es $V^*(T) = 2,64\times10^{-3}$ m^{-3}, con $P^*(T) = 0,618\times10^5$ Pa y $T_{\max} = -b/2a = 19,7$ K. Por tanto, el diagrama $S - T$ dado en la Fig. 18 el camino que se sigue es el (1).

A lo largo de la recta $P = aV + b$ hay un pequeño intervalo en el que la temperatura del gas disminuye a pesar de que se absorbe calor [3]. Son, por tanto, las variaciones de entropía las que determinan los intercambios de calor y no las variaciones de temperatura [?].

[3] Un estudio pormenorizado de la variación de la capacidad calorífica a lo largo de la línea recta puede verse en Ref. [?]. Ciclos con líneas rectas de pendiente negativa se han estudiado en Refs. [?], [?] y [?].

Una combinación de mq́uinas.

En la mayoría de las introducciones al Segundo Principio de la Termodinámica aparece la demostración de que una máquina de Carnot es la máquina térmica más eficiente trabajando entre dos focos a distintas temperaturas. Para ello se utiliza un argumento de reducción al absurdo y se admite que existe una máquina (máquina Panacea) con mayor rendimiento que la de Carnot trabajando entre las mismas temperaturas. Cuando la máquina Panacea se conecta con la máquina de Carnot (funcionando como frigorífico) se encuentra que la combinación de ambas va contra las distintas formulaciones del Segundo Principio. O bien se obtiene trabajo en un proceso cíclico a partir de un solo foco de calor, o bien pasa espontaneamente calor de un foco frío a un foco caliente. Ambas situaciones no parecen tener lugar nunca en la realidad, lo que descarta la hipótesis de partida, que la máquina Panacea existe, lo que demuestra el Teorema de Carnot.

Ejemplo ??.6. *Un falso móvil perpetuo de segunda especie*

Considérese una máquina de Carnot y una Máquina Real que trabaja con, obviamente, menor rendimiento que el Motor de Carnot funcionando entre las mismas temperaturas. Ambas máquinas funcionan entre un foco a $T_\mathrm{c} = 300$ K y otro foco a $T_\mathrm{f} = 150$ K, (ambas temperaturas empíricas del gas ideal). Para el motor de Carnot, si se toman 10 J de calor del foco caliente, se ceden 5 J al foco frío y se obtienen 5 J de trabajo total. Si la máquina real tiene un rendimiento de 2/5 del motor de Carnot, es decir $\eta_\mathrm{R} = 1/5$, si se toman 10 J del foco caliente se ceden 8 J al foco frío y se obtienen 2 J de trabajo total (ver Fig. 19(1)).

Se conectan el motor de Carnot y la máquina Real funcionado como frigorífico. El motor de Carnot toma 4 J del foco caliente, cede 2 J al foco frío y proporciona 2 J de trabajo neto. Con estos 2 J se pone en funcionamiento el frigorífico Real, que de acuerdo con lo anterior toma 8 J del foco frío y cede 10 J al foco caliente (ver Fig. 19(2)). El resultado global es que se han transferido 6 J (2-8=-6 J) del foco frío y se han trasladado al foco caliente, sin ningún otro cambio, pues las máquinas realizan procesos cíclicos. Puesto que ésto es imposible, ¿donde se encuentra el error en el razonamiento anterior?

Descripción termodinámica

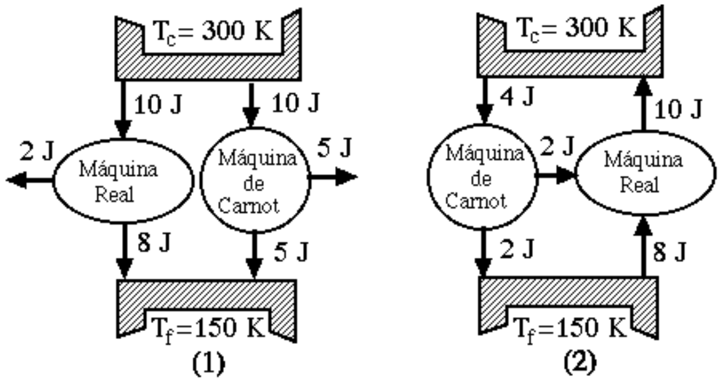

Figura 19: (1) Rendimentos del Motor de Carnot y de la Máquina Real. (2) Combinación de ambas máquinas que se comporta como un móvil perpetuo de segunda especie y contradice la formulación de Clausius del Segundo Principio.

Cualquier Máquina Real implica procesos irreversibles. Cuando el ciclo real se produzca a la inversa, los flujos de calor no se invierten respecto de los primeros sino que son diferentes [4]. En el razonamiento anterior, la falacia se encuentra en que se admite implícitamente que la Máquina Real funciona como frigorífico de *manera exactamente inversa* a como funciona como máquina térmica, lo que no es cierto. *Conocido el rendimiento de un motor térmico real, no es posible calcular su eficiencia como máquina frigorífica.*

Por el contrario, en una máquina de Carnot, el rendimiento como motor, Ec.(**??**), es $\eta_C = 1 - T_2/T_1$ y su eficiencia como frigorífico, Ec.(**??**), es $\mu_C = T_2/(T_1 - T_2)$, por lo que $\mu_C = (1 - \eta_C)/\eta_C$. (Ver Cap. **??**).

Si la Máquina Real como motor térmico toma 10 J del foco caliente y cede 8 J al foco frío y produce 2 J de trabajo, como frigorífico se puede suponer que necesitará del orden de 16 J de trabajo para extraer 8 J del foco frío y cederá 24 J al foco caliente, con una eficiencia de 0,5, también menor que la eficiencia del frigorífico de Carnot, que en este caso es de 1. El motor de Carnot conectado a ésta tendría que tomar 32 J del foco caliente, cedería 16 al foco frío y los 16 J de trabajo se

[4] Esto se reconocerá en la demostración más adelante, del Teorema de Clausius, Ejemplo **??**.3.

tomarían de la Máquina Real. El resultado global sería entonces de 32-24=8 J que pasan *espontáneamente* del foco caliente al foco frío, lo que no tiene nada de particular [5].

En resumen: en las máquinas reales, que realizan procesos irreversibles, *no hay ninguna relación entre el rendimiento como motores térmicos η y la eficiencia como frigoríficos μ*; en las máquinas que sólo realizan procesos reversibles, pero diferentes de las máquinas de Carnot, es posible encontrar una relación entre η y μ, pero *esa relación no es universal* y depende de la sustancia que realice el ciclo y del propio ciclo; sólo para las máquinas de Carnot es posible encontrar una *relación universal entre rendimiento y eficiencia* [6]. Sólo una máquina de Carnot tiene los calores y trabajos exactamente invertidos al funcionar como motor y como frigorífico entre todas las máquinas que funcionan entre dos focos a temperaturas diferentes [**?**].

Los concentradores sin imágenes.

Curiosamente, la Óptica no ha sido un campo muy fructífero a la hora de construir MPSE, lo que seguramente repercute en las pocas relaciones que se establecen entre Óptica y Termodinámica.

Se puede intentar construir un MPSE utilizando médios propios de la Óptica de la siguiente manera. La intensidad de la luz en la superficie de una estrella es función de su temperatura. Si a una cierta distancia de la estrella se dispone de un dispositivo concentrador, por ejemplo una lente convergente, se puede lograr aumentar la intensidad de la luz que llega, aumentando así su temperatura. Si esta concentración fuera tal que fuera superior a la intensidad de la propia estrella, se tendría un sistema a una temperatura superior a la de la estrella. se tendrían por tanto dos focos a diferentes temperaturas y se podrían utilizar para obtener trabajo mecánico utilizando máquinas térmicas. Pero en realidad, sólo se dispone de un verdadero foco de calor que es la estrella original, luego finalmente lo que se tendría es un medio de obtener trabajo mecánico en procesos cíclicos a partir de un sólo foco de calor, lo que no parece estar

[5] Se han descrito muchos dispositivos que (aparentemente) violan el Segundo Principio. Tal vez el más famoso sea el denominado *diablillo de Maxwell*, ver Refs. [**?**], [**?**], [**?**]. Ver también Refs. [**?**], [**?**] y [**?**].

[6] Esa relación ya se ha apuntado, pero se deducirá en el Cap. **??**.

permitido por la formulación de Kelvin-Planck del Segundo Principio de la Termodinámica.

Esta imposibilidad de construir una máquina tal impone curiosamente un límite a la concentración máxima de los rayos solares sobre la superficie de la Tierra. De acuerdo con la extensión de la superficie del Sol y la superficie que ocupa una esfera del radio de la órbita de la Tierra alrededor del Sol, la intensidad de la luz en la superficie del Sol es 46000 veces mayor que la intensidad sobre la Tierra. Por tanto, de acuerdo con la Termodinámica, ningún dispositivo puede concentrar la luz solar sobre la Tierra con un valor mayor que el anterior. Curiosamente, el autor de estos razonamientos indica que en caso contrario *sería posible construir una máquina térmica que trabajara entre el Sol y el concentrador y que sería capaz de producir energía sin coste alguno*. Parece que el autor tiene en la cabeza un MPPE en contraste con el MPSE que parece imaginable.

Supóngase ahora que se dispone de dos depósitos iguales, ambos con un mismo gas a la misma presión y temperatura. Se puede entonces razonar de la siguiente manera. Si se practica un orificio de tamaño S en un depósito y un orificio de tamaño $S' < S$ en el otro, el número de partículas que por unidad de tiempo abandona el primer depósito es mayor que el número de partículas que abandona el segundo. Si ahora se conectan ambos depósitos mediante dos colimadores y un embudo, el segundo depósito ve aumentado su número de partículas mientras que el segundo lo ve disminuido. Se obtiene así una diferencia de presiones entre ambos depósitos que puede ser utilizada en obtener trabajo.

La clave para entender por qué no va a funcionar este móvil está precisamente en el embudo. Sí es cierto que salen más partículas por unidad de tiempo del primer depósito que del segundo, pero no es cierto que se puedan meter espontáneamente a través del embudo. Imaginando que todas las partículas viajan en la misma dirección y paralelas a los colimadores, es fácil ver que aquellas que lleguen desde el primer depósito fuera del círculo del segundo orificio sencillamente rebotarán en las paredes del embudo y volverán al primer depósito, con lo que no se produce ninguna perdida neta de partículas por parte de ninguno de los dos depósitos y no hay tal móvil perpetuo.

El razonamiento anterior se puede aplicar al caso en que en vez de depósitos con gases se tienen dos cuerpos negros a temperatura

T. En ese caso se debe sustituir el embudo por alguna clase de lente convergente. Se razona entonces que por unidad de tiempo más energía abandona el primer depósito que el segundo, pues la intensidad es función de la temperatura y esta es la misma en ambos, pero el primer orificio es mayor que el segundo. Como la lente convergente logra concentrar toda la energía que sale del primero en la misma sección del segundo orificio, hay una ganancia neta de energía por parte del segundo cuerpo negro, que se puede así calentar por encima de la temperatura del primero. Con esa diferencia de temperaturas se puede construir un móvil perpetuo, pues finalemente se habrá logrado obtener trabajo a partir de un único foco.

El razonamiento que se ha aplicado en el caso de los concentradores ópticos anteriores es que puesto que tal móvil no debe poder construirse, se establece un límite máximo a la intensidad que se puede lograr sobre la segunda sección a partir de fotones emitidos desde la primera sección.

5 Móviles perpetuos de tercera especie

Ejemplo ??.3. *Móvil perpetuo tercera especie*

Supóngase que se realiza un ciclo de Carnot con una cierta sustancia como fluido de trabajo entre las temperaturas T_2 y T_1 (temperaturas de las isotermas del ciclo) y supóngase además que el coeficiente de dilatación de la sustancia operante es nulo a la temperatura T_2, $\alpha(T_2) = 0$, *independientemente de la presión.* Se puede argumentar de la siguiente manera: dado que se tiene un ciclo, la suma de todas las variaciones de entropía del sistema debe ser cero : $\Delta S_{12} + \Delta S_{23} + \Delta S_{34} + \Delta S_{41} = 0$. Como los procesos adiabáticos son reversibles, se tiene $\Delta S_{23} = \Delta S_{41} = 0$.

En la isoterma a T_1 la variación de entropía viene dada por $\Delta S_{12} = Q_1/T_1 > 0$, pues el sistema absorbe calor en contacto con el foco caliente. A su vez, en el foco a T_2 se tiene

$$\mathrm{d}S = \frac{C_V}{T_2}\mathrm{d}T + \frac{\alpha}{\kappa_T}\,\mathrm{d}V = 0\,,$$

pues $\mathrm{d}T = 0$ y a esa temperatura el coeficiente de dilatación del sistema es $\alpha(T) = 0$. Por tanto,

$$\Delta S_{12} + \Delta S_{23} + \Delta S_{34} + \Delta S_{41} = \frac{Q_1}{T_1} \neq 0\,,$$

lo que es incompatible con el carácter de función de estado de la entropía. ¿Dónde se encuentra el error de estos razonamientos?

Aunque parezca algo sorprendente, ciertos ciclos de Carnot no pueden llevarse a cabo. Cuando a una determinada temperatura un sistema presenta un coeficiente de dilatación nulo, $\alpha = 0$ (a cualquier presión), dicha isoterma no puede ser utilizada para realizar un ciclo de Carnot. En este caso, *la isoterma a esa temperatura y la isoentrópica que comienzan en un mismo punto coinciden.* Esta coincidencia impide que *la isoterma se pueda alcanzar por vía adiabática reversible* [7].

Como el realizar un ciclo de Carnot exige que se pase de una isoterma a otra a través de un proceso adiabático reversible, si no se puede alcanzar la isoterma mediante ese proceso, se concluye que no se puede cerrar el ciclo de Carnot en esas condiciones.

Para ver que la isoentrópica y la isoterma coinciden a la temperatura a la que $\alpha = 0$, nótese que si una adiabática es cortada por una isoterma, la razón de las pendientes de la adiabática y de la isoterma en el punto de corte, en un diagrama (VP), viene dada por la razón entre las derivadas parciales

$$\frac{-\left(\frac{\partial P}{\partial V}\right)_S}{-\left(\frac{\partial P}{\partial V}\right)_T} = \frac{\kappa_S}{\kappa_T} = \frac{C_V}{C_P}\,.$$

Por la relación de Mayer, se tiene que

$$C_P - C_V = \frac{TV\alpha^2}{\kappa_T}\,.$$

Esto significa que $C_P = C_V$ cuando $\alpha(T) = 0$, lo que a su vez implica que la razón entre las pendientes de la isoterma y de la isoentrópica vale exactamente 1 a cualquier presión, por lo que el coeficiente de compresibilidad isoterma coincide con el de compresibilidad adiabática, y deben coincidir la isoterma y la isoentrópica a la temperatura a la que $\alpha = 0$. Las adiabáticas situadas en las proximidades de esta isoterma están tan próximas de sus isotermas correspondientes que es necesario un aumento enorme del volumen para que la temperatura del sistema varíe significativamente. A medida que el sistema se aproxima a la isoterma en cuestión, esta variación de volumen tiende a infinito [**?**]. Aunque como se verá en el Cap.**??** las condiciones de estabilidad termodinámicas no prohiban que existan sustancias con coeficientes de dilatación nulos, estas no pueden

[7] Pues dos isoentrópicas diferentes no se pueden cortar (ver Ref. [**?**]) en un diagrama (VP)

ser utilizadas para llevar a cabo ciclos de Carnot [8]

---

6 Móviles perpetuos que funcionan realmente.

Para terminar, no se deben confundir los móviles perpetuos con los móviles gratuitos. En el caso de los móviles gratuitos, perfectamente posibles, se trata de sistemas que utilizan normalmente un mismo foco con el que intercambiar calor, pero este foco adopta distintas temperaturas a lo largo del intervalo de tiempo que dura un ciclo. Por esa razón, aunque el entorno de estos móviles gratuitos es único, no lo son sus temperaturas, por lo que no hay nada en contra de la Termodinámica en su comportamiento.

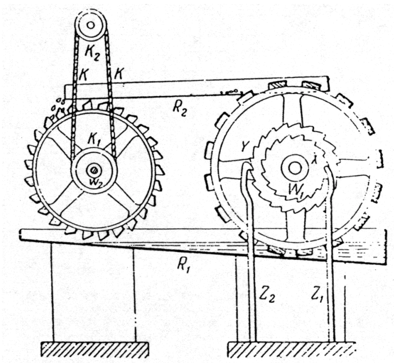

Figura 20: Una máquina gratuita.

En el caso del motor de P. Droz, un muelle bimetálico se ytiliza para dar cuerda a un reloj, que con las alternancias de temperatura del día y de la noche, funciona de manera permanente sin necesidad de darle cuerda. En el caso de los muelles bimetálicos, se trata de placas de diferentes metálicas firmemente unidas entre sí. Como ambos metales tienen diferente coeficiente de dilatación, el dispositivo

[8]En el caso del agua, la condición de que $\alpha(T) = 0$ a cualquier presión no se cumple, por lo que la isoterma a 3,98 °C podría utilizarse para llevar a cabo ciclos de Carnot. Ver Ref.[**?**]). En el cero absoluto (Cap. **??**), $\alpha = 0$ para cualquier sustancia pura y a cualquier presión, por lo que esa isoterma tampoco se puede utilizar para realizar ciclos de Carnot, ver Ref. [**?**].

como un todo se mueve cuando se produce una variación de la temperatura. Este movimiento se utiliza para lograr que se mueva una cierta rueda dentada, siempre en la misma dirección. Un mecanismo de este tipo se utiliza en algunos dispositivos termostáticos, de tal manera que se conecta (o desconecta) un circuito eléctrico al variar la temperatura.

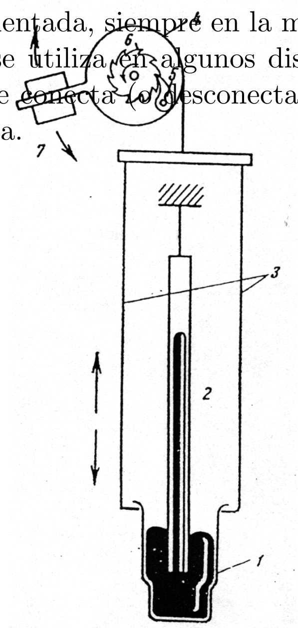

Figura 21: Motor barométrico de Cocks. (V. M. Brodianski, *Móvil perpetuo antes y ahora*, Ed. Mir, Moscú (1989)).

Una variante de este es el motor barométrico de cocks. En este caso se utilizan las variaciones de la presión atmosférica para mover una rueda dentada. En este caso, el tubo de mercurio está fijo, mientras que la taza suspendida con mercurio está unida a un mecanismo de rueda dentada y un contrapeso. Cuando la presión aumenta, más mercurio penetra en el tubo y la taza disminuye de peso, pues el tubo de vidrio está fijo. Entonces, el contrapeso se desequilibra y hace que se mueva la rueda dentada. Este movimiento se puede utilizar para alguna otra operación, como dar cuerda a un reloj.

Una variante que utiliza tanto las subidas como las bajadas de temperatura es un reloj de mercurio. En este caso se dispone de dos varillas. La varilla Z_1 se apoya en la rueda X de tal manera que la hace girar cuando la varilla se dilata por efecto del aumento de la temperatura. La varilla Z_2 se apoya en la rueda Y de tal forma que la mueve cuando se contrae por efecto de la disminución de la temperatura. El efecto neto de ambos movimientos es lograr elevar

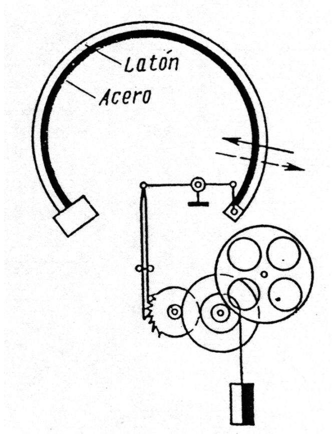

Figura 22: Motor de P. Droz para dar cuerda a un reloj utilizando un resorte bimetálico. (V. M. Brodianski, *Móvil perpetuo antes y ahora*, Ed. Mir, Moscú (1989)).

una cierta cantidad de mercurio mediante unos cangilones unidos a la rueda dentada, mercurio que luego puede ser dejado caer sobre otra rueda dentada que es la que da cuerda al reloj finalmente.

En la realidad, estos móviles gratuitos resultan en general bastante caros. Por ejemplo, en el caso del reloj de mercurio anterior, puede suponerse que se necesiten 10 J de energía, el equivalente a subir una pesa de 1 Kg un metro de altura, para hacerlo funcionar un día entero, es decir, 86400 segundos. Esto significa que la potencia desarrollada por el reloj es de 1/8640 vatios. Aunque construir el reloj costara únicamente una peseta, el capital invertido por vatio instalado sería de 8640 pesetas. Si se tiene en cuenta que una empresa eléctrica cobre del orden de 0.5 pesetas por vatio instalado, se verá que el mecanismo del reloj de mercurio resulta un poco caro para ser gratuito.

Otro móvil perpetuo interesante es el denominado Pato Feliz (Happy Duck). En este caso se trata de un matraz que contiene una cierta cantidad de eter, un cuello largo con otro pequeño matraz recubierto de algodon absorbente y que forma la cabeza del pato. Todo ello está colocado sobre una estructura tal que permite que el conjunto bascule. Este móvil puede permanecer en movimiento continuo sin más que humedecer inicialmente la cabeza del pato y luego colocarlo de tal manera que cuando bascule pueda introducir el pico en un vaso con agua. Se produce entonces un movimiento pendular. Poco a poco el pato va bajando su cabeza hasta que finalmente la introduce en el vaso de agua. En ese momento empieza a levantarse y se separa del vaso. Sigue cabezeando hasta que vuelve al vaso y el proceso se repite mientras haya agua en el vaso.

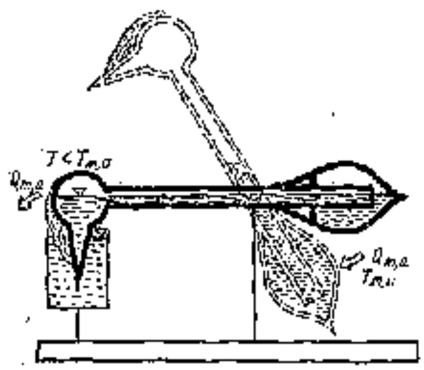

Figura 23: Pato chino. (V. M. Brodianski, *Móvil perpetuo antes y ahora*, Ed. Mir, Moscú (1989)).

Para entender cómo funciona este mecanismo es conveniente colocar todo el conjunto bajo una campana de cristal. En ese caso, se va comprobando que el pato se mueve cada vez más lentamente hasta que finalemente ya no se mueve. Si se retira la campana de cristal, el proceso vuelve a repetirse. Muy aproximadamente, lo que sucede es lo siguiente. Cuando se humedece la cabeza del pato, el agua empapa el algodón. Pero como la humedad relativa del aire no es del 100 %, el agua (que tiene una gran superficie en el algodón) se evapora. Al evaporarse enfría el matraz pequeño que lleva en la cabeza y algo de eter se condensa en el matraz. El proceso de evaporación continúa y cada vez se condensa más eter en la cabeza, que va basculando. Cuando el pico llega a meterse de nuevo en el agua, el eter de la cabeza se vuelve a poner a temperatura ambiente y se evapora, condensándose en el matraz inferior, que hace entonces que la cabeza se levante. Por tanto, el proceso se repite siempre que la humedad relativa del aire no sea la de saturación. La saturación se logra colocando la campana de cristal y eso es lo que hace que el pato deje de moverse.

7 Algunas propuestas recientes

defiende que además de la gravedad de atracción existe otra fuerza dinámica

Un catedrático cántabro descubre un sistema para desarrollar velocidades 'espaciales'

MARISOL LLANO. Santander

El catedrático cántabro ha patentado un sistema de propulsión que puede desarrollar velocidades "inimaginables y hasta ahora desconocidas". Para el desarrollo de este invento, se ha basado en lo que él denomina gravedad dinámica, que sólo se activaría cuando un cuerpo está rotando.

santanderino que ejerce como catedrático de Física en la Universidad del País Vasco, entró en contacto con esta teoría hace cinco años, a través de un colega alemán , hijo de un científico que ya avanzó la posibilidad de que existiera esta fuerza de gravedad dinámica.

decidieron entonces asociarse e investigar juntos esta teoría, que ya han demostrado en un experimento en una caja de cinco kilos colocada en un plano inclinado hacia arriba.

En el interior de la caja está dispuesto un mecanismo que rota en donde se ha colocado un masa de 62,5 gramos, que al accionarle movimiento mediante un sistema eléctrico provoca que la caja venza la fuerza de rozamiento y se desplace hacia arriba.

El experimento, según manifesta el doctor en Físicas, es positivo también si se coloca delante de la caja un obstáculo añadido de tres kilos.

No obstante, para que este impulso sea continuado y su socio alemán idearon un sistema de tubos que garantizan que el impulso sea permanente, y así la velocidad no se detenga.

Para , las aplicaciones de este sistema, que ya está patentado en Alemania, tiene innumerables aplicaciones, sobre todo en sectores e industrias que estén relacionadadas con la propulsión, como los aviones y los medios de transporte en general.

No obstante, dado que el sistema sirve para cualquier objeto móvil y que no necesita oxígeno para su realización, además de ofrecer la posibilidad de alcanzar velocidades enormes, el científico sugiere las naves espaciales como aplicación principal.

se doctoró en Ciencias Físicas en la Universidad de Cantabria, donde impartió luego la docencia en la Escuela de Náutica, hasta que consiguió una plaza en la Universidad del País Vasco.

Desde que comenzara a investigar con la teoría de la gravedad dinámica, compagina su trabajo en Bilbao con su vida habitual en Santander y con los viajes a Ecuador, donde tiene su base de investigación su colega

en su despacho en la Universidad de Cantabria. JAVIER COTERA

Figura 24: Una propuesta reciente.

Siempre se ha dicho que la Termodinámica puede indicar si una determinada transformación energética es o no posible con independencia del dispositivo que se utilice.

Por ejemplo

> *Con el hidrógeno producido por la descomposición de medio litro de agua se puede realizar en coche el viaje Bilbao-Valencia (633 km).*

El gasto energético de un coche en un viaje de esas características puede realizarse de varias maneras. Debe tenerse en cuenta que el gasto mecánico (para vencer el rozamiento de la carretera y el aire) debe ser proporcionado por la combustión de un gas en un motor de explosión que no convierte totalmente en energía mecánica la energía disponible (la disminución de la función de Gibbs en estas condiciones de temperatura y presión constante a la entrada y salida del combustible). Un buen motor de combustión tiene una eficacia en este sentido del 20%.

(i) Gasto de energía de un coche (de unos 1500 kg y a una velocidad media de 100 km/h) en el trayecto Bilbao-Valencia (633 km).

28 / SOCIEDAD

EL PAÍS, sábado 7 de febrero de 1998

muestran agua, de la que saldría el hidrógeno para obtener energía.

SANTIAGO CARREGUÍ

La Universidad de Valencia anuncia un método barato de extraer energía del agua

Dos científicos auguran que su logro permitirá que el hidrógeno reemplace al petróleo

FERRAN BONO, Valencia

Dos investigadores de la Universidad de Valencia, afirmaron ayer que han descubierto una manera de obtener energía mediante una descomposición del agua que tiene un coste económico "despreciable", a diferencia de otros procedimientos similares. Sin embargo, los investigadores no dieron datos concretos sobre el rendimiento obtenido ni los han publicado todavía en ninguna revista especializada. Sólo explicaron que, de forma muy barata y no contaminante, un catalizador de molibdeno descompone el agua en oxígeno e hidrógeno.

"Los resultados son científicamente fiables", dijo el director de la investigación, de 50 años. El catedrático de ingeniería química de la misma universidad Antonio Aucejo fue uno de los científicos ajenos a la investigación que presenció ayer una demostración del proceso y verificó la emisión de "una cantidad importante de gases". La mayor parte era hidrógeno, según afirmaron Aucejo apuntó que aún se ha de realizar un análisis exahustivo y conocer muchos más datos relacionados con el origen de la energía de activación, que, en el caso de la electrolisis, por ejemplo, es la electricidad. No obstante, consideró el descubrimiento como "muy interesante y espectacular".

Con el hidrógeno generado en medio litro de agua "se puede ir en coche de Bilbao a Valencia [633 kilómetros]", proclamó Y añadió que la descomposición del agua se realiza a temperatura ambiente y utilizando la energía ambiental (calor o luz). No quiso revelar en cambio todos los componentes del catalizador que desata la reacción química, que es un compuesto de molibdeno, un metal con actividades catalíticas. De hecho, la fórmula de este compuesto es el secreto mejor guardado. Después de depositar en una notaría todos los estudios al respecto e iniciar los trámites para registrarlo y patentarlo, la Universidad de Valencia decidió presentar el descubrimiento en conferencia de prensa con el fin de evitar cualquier apropiación. Esta poco habitual forma de actuar, sin presentar previamente a la comunidad científica el hallazgo, responde al hecho de que las investigaciones se han realizado en los laboratorios universitarios, "donde terceras personas podían tener acceso a información", ha manifestado un vicerrector.

Prudencia

[El anuncio fue acogido ayer con prudencia, ante la falta de información, por científicos consultados por este periódico, dado que son muchos los intentos de obtener hidrógeno de forma barata para utilizarlo como combustible. El catalizador más utilizado, y mediante electrolisis, es el de paladio-platino, que hace el proceso económicamente inviable. Según las opiniones recogidas, éste no es imposible si los investigadores valencianos han conseguido una reacción química o fotoquímica, que se activa con la energía solar, aunque es muy dudoso que el rendimiento conseguido sea suficiente para que el proceso resulte económicamente rentable. Carlos Sánchez, de la Universidad Autónoma de Madrid, señaló que no ha oído hablar nunca de una sustancia que pudiera descomponer el agua directamente, por lo que el logro sería relevante; y si resulta económicamente viable, más todavía. Pero también recordó que existen reacciones de oxidación de metales en agua que desprenden hidrógeno pero también consumen el metal, por lo que no se puede hablar de catálisis y no sirven para producir hidrógeno como combustible].

Figura 25: Otra propuesta reciente.

En un barril de petróleo (aproximádamente unos 138 L) la energía libre que se libera en su combustión es del orden de $6,5 \times 10^9$ J (S. Strauss, *The Sizesaurus*, Kodansha International, Toronto, Canada, (1995), pag. 148). Un automóvil Toyota LandCruiser (unos 1500 kg) consume unos 7,6 L de gasolina por cada 100 km recorridos (*The Sizesaurus*, pag. 156), por lo que en un viaje de 633 km de un automóvil de este tipo se consume una energía (aunque sólo un porcentaje del orden del 20% se convierte en energía mecánica) de unos

$$W_{\rm c} \approx \frac{6,5 \times 10^9}{138} \times 7,6 \times \frac{633}{100} = 22,5 \times 10^8 \text{ J} .$$

Si la potencia consumida por un automóvil (se supone que en forma de combustible y no mecánica) es del orden de 100 kW (O. Levenspiel, *Understanding Engineering Thermo*, Prentice Hall, Upper Saddle River (1996), pag. 91), en un viaje que a 100 km/h dura unas 6,3 horas, se tiene que la energía consumida debe ser del orden de

$$W_{\rm c} \approx 100 \times 10^3 \times 6,33 \times 3600 = 22,78 \times 10^8 \text{ J} .$$

Suponiendo que toda la gasolina es n-octano (densidad 0,88 g/L) y teniendo en cuenta que la energía libre de Gibbs de formación del CO_2(g) es de $\Delta G^{\ominus}(CO_2) = -394$ J/mol; que la energía libre de Gibbs de formación del H_2O (g) es de $\Delta G^{\ominus}(H_2O) = -228,4$ J/mol; que la energía libre de Gibbs de formación del n-octano C_8H_{18}(g) es de $\Delta G^{\ominus}(C_8H_{18}) = 16,51$ J/mol, (YA. Guerasimov *et al.*, *Curso de Química Física*, Ed. Mir, Moscú (1977), pags. 606-608) se tiene que la variación de la energía libre de Gibbs de combustión del n-octano es de

$$C_8H_{18} = 8C + 9H_2 \ \ -16,51 \text{ J/mol}\,,$$

$$8C + 16O_2 \ = 8CO_2 \ \ -8 \times 394 \text{ J/mol}\,,$$

$$9H_2 + \frac{9}{2}O_2 \ = 9H_2O \ \ -9 \times 228,4 \text{ J/mol}\,,$$

$$C_8H_{18} + \frac{25}{2}O_2 = 8CO_2 + 9H_2O \ \Delta G^{\ominus} \ = -5,20 \times 10^6 \text{ J/mol}\,.$$

Teniendo en cuenta que en 1 L de gasolina habría unos 880 g de n-octano (Peso Molecular 114), se tendrían unas 7,72 moles de n-octano. En un viaje de 633 km, en el que se consuman unos 7,6 litros de gasolina por cada 100 km, hay un gasto energético en gasolina de unos

$$7,72 \times (7,6 \times 6,33) \times 5,22 \times 10^6 \approx 19,3 \times 10^8 \text{ J.}$$

Los valores obtenidos mediantes gastos energéticos de combustible son bastante coincidentes.

El coeficiente de fricción por rodadura del caucho con el cemento es del orden de 0,01-0,02 (tomamos 0,015) (P. A. Tipler, *Física*, Reverté, Tercera Ed., Barcelona (1995), pag. 113). Esto implicaría que un coche lanzado a 100 km/h necesitaría unos 2,6 km. Si se toma el dato, más realista (Dirección General de Tráfico) de que por efecto del rozamiento del aire, un coche lanzado a esa velocidad recorre unos 1000 m hasta pararse sin trabar los frenos, se tendría un coeficiente conjunto de fricción de aproximadamente 0,04.

la energía necesaria para desplazar un coche de un peso de 1500 kg unos 6,33$\times 10^6$ m es del orden de

$$W \approx 0,040 \times 9,8 \times 1500 \times 6,33 \times 10^3 = 370 \times 10^8 \text{ J}.$$

Admitiendo que un motor de explosión de un automóvil tiene un eficacia transformadora del orden del 20%, la energía producida por la combustión de gasolina (de la que sólo se utiliza el 20%) debe ser del orden de

$$W_{\text{g}} \approx \frac{370 \times 10^8}{0,20} = 18,5 \times 10^8 \text{ J}.$$

Este resultado también es concordante con los anteriores.

(ii) *Coste energético de la descomposición del agua.* De acuerdo con los datos termodinámicos (*Understanding Engineering Thermo*, pag. 315) la disminución de la función de Gibbs (máximo trabajo que se puede obtener) en la combustión del H_2 con el O_2 para dar H_2o a 298 K y 102,3 kPa, es de

$$\text{H}_2 + \frac{1}{2}\text{O}_2 = \text{H}_2\text{O} \ \Delta G^{\ominus} = -237,2 \text{ kJ/mol}.$$

Teniendo en cuenta que en $2 \times 0,5$ kg de agua (Peso Molecular 18) hay aproximadamente $2 \times 27,8$ moles de agua, se pueden obtener $2 \times 27,8$ moles de H_2 una vez descompuesta el agua. Con la combustión de estas moles de H_2 se obtiene una disminución de la función de Gibbs de

$$W_{\text{h}} \approx 2 \times 27,8 \times 237,2 \times 10^3 = 2 \times 6,6 \times 10^6 = 13,2 \times 10^6 \text{ J}.$$

Este es el máximo trabajo que se puede obtener (suponiendo que en el motor entran hidrógeno y oxígeno a presión y temperatura estándar y sale agua líquida en las mismas condiciones de temperatura y presión) si se lleva a cabo la combustión del hidrógeno, por litro de agua descompuesto.

(iii) *Gasto de agua.* Suponiendo un motor de combustión de hidrógeno que transforme toda la disminución de la función de Gibbs en energía mecánica, se necesitarían descomponer en hidrógeno y oxígeno del orden de (en el caso más favorable) de $3,70 \times 10^8 / 2 \times$

$6,6 \times 10^6 = 28$ litros de agua para llevar a cabo el viaje anterior. Si el motor de hidrógeno que se utilice tiene una eficacia del 20%, se necesitarán descomponer $28 \times 5 = 140$ litros de agua para proporcionar el hidrógeno necesario para el viaje. Si se utilizan otros gastos energéticos más realistas, el número de litros de agua que deben descomponerse aumenta considerablemente.

- (iii)] Al coste actual de $15,7$ ptas/kwh de tarifa eléctrica, y teniendo en cuenta que se necesitan 3,52 kwh de energía para descomponer 1 L de agua (suponiendo una eficacia de hidrólisis del 100 % (este dato no lo tengo contrastado)), el viaje con un motor de hidrógeno de una eficacia razonable (100%) costaría del orden de 1550 ptas (o de 7745 ptas en caso de un motor al 20%).

  Tomando un precio de gasolina de 120 ptas/L, con el consumo anterior de 7,6 L/100 km, el precio sería de 5772 ptas.

Es pues evidente que la Termodinámica indica que la anterior afirmación no puede ser correcta.