

LA GENESIS DE LA TERMODINAMICA

**Fernando León Gutiérrez
Ingeniero Químico
Departamento de Química
Universidad de Antioquia**

Análisis de la obra: "Reflexiones sobre la potencia mostriz del fuego y las máquinas propias para desarrollar esta potencia" de Nicolás Léonard Sadi Carnot.

El presente trabajo, hace parte de las actividades realizadas dentro del ciclo de seminarios de Historia y Filosofía de las Ciencias, programados por la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, bajo la dirección del profesor Jorge Puerta.

Para el efecto, se ha usado la versión original: "Reflexions Sur La Puissance Motrice Du Feu" chez Bachelier, Libraire Paris 1824, y la traducción al inglés de E. Mendoza, Dover Publications In. N.Y. 1960.

INTRODUCCION

"Para comprender la perfección y la belleza de los conceptos de la física moderna, es menester estudiar sus orígenes y su evolución. Solamente en este caso podrán hacerse nos íntimos y comprensibles, igual que nos es íntima la patria, cuya historia y cultura habíamos asimilado con la leche materna'.

L. Ponomariov

En nuestros recintos universitarios, para estudiar ciencias de la naturaleza, es habitual recurrir a textos producidos por catedráticos, norteamericanos casi siempre, en los cuales las teorías científicas discurren sin sobresaltos, como lenguajes conclusos y sin historia, o cuya única historia consiste en el nombre de algún famoso investigador dado a ésta o aquélla ecuación.

Con la confianza de lograr superar las primeras imágenes producidas por una instrucción deformante, hemos realizado la lectura de la obra de Sadi Carnot, que la tradición científica conviene en señalar como el origen de una de las teorías de la física moderna, cual es la termodinámica, iniciando con ello un recorrido por la estructura de este valioso instrumento del conocimiento, que habrá de permitirnos recrear el proceso de su formulación y desarrollo, observando sus encantos e imperfecciones, sus logros y limitaciones, sus dudas y afirmaciones.

Deseamos consignar aquí las impresiones suscitadas por la lectura de la obra antes mencionada. Tal lectura es siempre diferente, varía con las circunstancias de lugar y tiempo. El lenguaje es un entramado dinámico de elementos simbólicos, generador de imágenes que se dilatan y se angostan, que se alejan y regresan, que se pliegan y se extienden, que adquieren nuevos sentidos en el contexto de cada uso.

EL OBJETO DE LAS REFLEXIONES

En la obra de Sadi Carnot, el título señala de manera precisa el contexto dentro del cual se inician sus reflexiones: comentando la práctica, desde tiempo atrás establecida, de utilizar las máquinas activadas mediante la combustión del carbón y el vapor de agua, las máquinas de vapor de agua como las designa, para remplazar con notable provecho las corrientes de aire, las caídas de agua y la fuerza de los animales en la realización de faenas domésticas, de transporte, industriales y mineras de aquella época, al producir el fenómeno social que hoy suele denominarse la Revolución Industrial.

El objeto y el método son descritos tempranamente en la obra: el autor quiere ocuparse de la eficiencia de las máquinas de vapor. El es un teórico, como diríamos hoy, formado en "L'école Polytechnique" de Francia, que tuvo como profesores un conjunto de pensadores famosos: Petit, Lame, Cauchy, Poisson; como también fueron célebres sus discípulos Clapeyron, Biot, Fresnel, Poiseuille. No trabajará, por lo tanto, sobre la máquina concreta para ensayar modificaciones dirigidas por el azar, como él las califica. Sus esfuerzos se dirigirán hacia la reflexión sistemática sobre los fenómenos empíricos relativos al funcionamiento de la máquina, para formular una teoría que le permita establecer las condiciones generales de factibilidad del aumento de la eficiencia, de su constitución, y su forma de operación.

He aquí, en palabras de Carnot, el problema central con el que se inicia el análisis y sobre el cual gravitara la obra, encontrando dentro del marco conceptual que allí se crea, un sentido definido y particular.

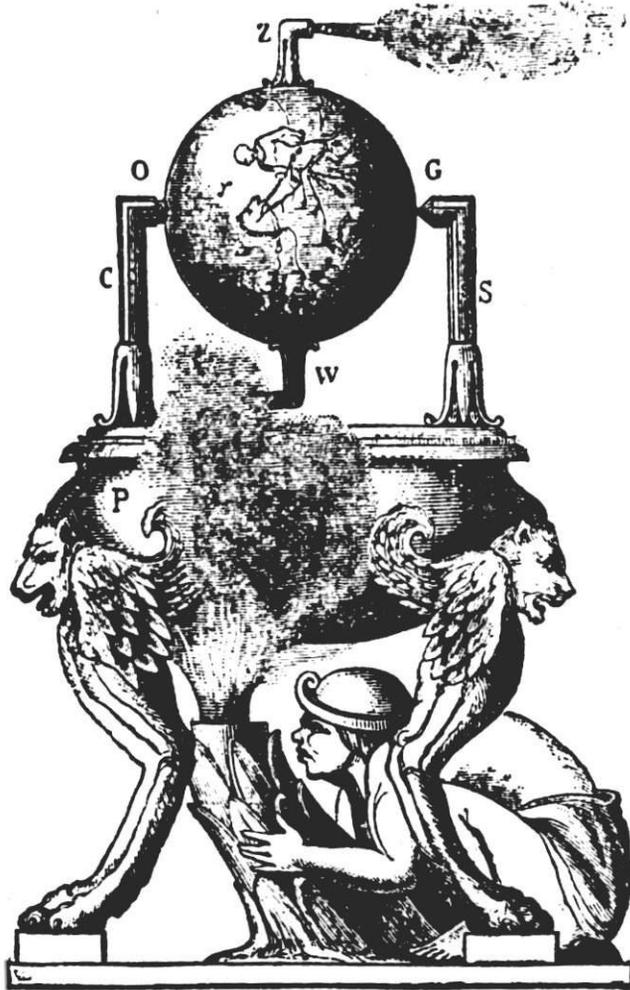


Foto 2. Bola de Eolo. Primera máquina de Vapor.

“Frecuentemente se pregunta si la potencia motriz del calor es limitada, si las mejoras posibles en las máquinas de vapor tienen un límite, un límite que la naturaleza de las cosas no permite superar cualquiera que sea el medio, o si por el contrario, estas mejoras pueden lograrse indefinidamente”.

EL IDEAL DE SU EPOCA

Carnot, que había asimilado el ideal del conocimiento de la época moderna instaurado por Galileo y luego cultivado fecundamente por Newton, insertará la máquina de vapor dentro de una estructura general, legal y ordenadora, reduciendo lo múltiple a lo único, a partir de pocos y sencillos principios.

“Para analizar en la forma más general el principio de la producción del movimiento por el calor, ello debe considerarse independientemente de todo mecanismo y todo agente particular. Es necesario establecer principios aplicables no solamente a las máquinas de vapor, sino a todas las máquinas de calor imaginables, cualquiera que sea la sustancia que actúa y cualquiera que sea la forma de operación”.

En este proceso de generalización, que parte de la máquina de vapor, Carnot encuentra que:

- En las máquinas térmicas actúan necesariamente cuerpos de baja y alta temperatura.
- La potencia motriz es generada por el cambio de volumen de la sustancia que trabaja.
- Postula entonces que:
 - El cambio de volumen es ocasionado por el flujo de calórico desde los cuerpos de alta temperatura a los de baja.
 - El flujo de calórico se produce por la tendencia natural al restablecimiento de un equilibrio roto por alguna causa, una reacción química por ejemplo.
 - El calórico se conserva y la sustancia (vapor de agua) es sólo un medio de transporte.

Con estos rudimentos de un nuevo lenguaje, de una nueva manera de pensar, entra Carnot en la escena de la ciencia moderna, inicia con ello la creación de una estructura ordenadora y unificadora de múltiples hechos, dispersos en variadas investigaciones, como podrá notarse posteriormente.

LAS IMAGENES PROVIENEN DE LA MECANICA

“Las máquinas que no reciben su movimiento del calor, aquéllas que tienen como motor la fuerza de los hombres, una caída de agua, una corriente de aire, etc, pueden ser estudiadas, hasta en los mínimos detalles, por la mecánica. Todos los casos son previsibles, todos los movimientos imaginables se refieren a principios generales, firmemente establecidos y aplicables bajo todas las circunstancias. Este es el carácter de una teoría completa. Una teoría similar es

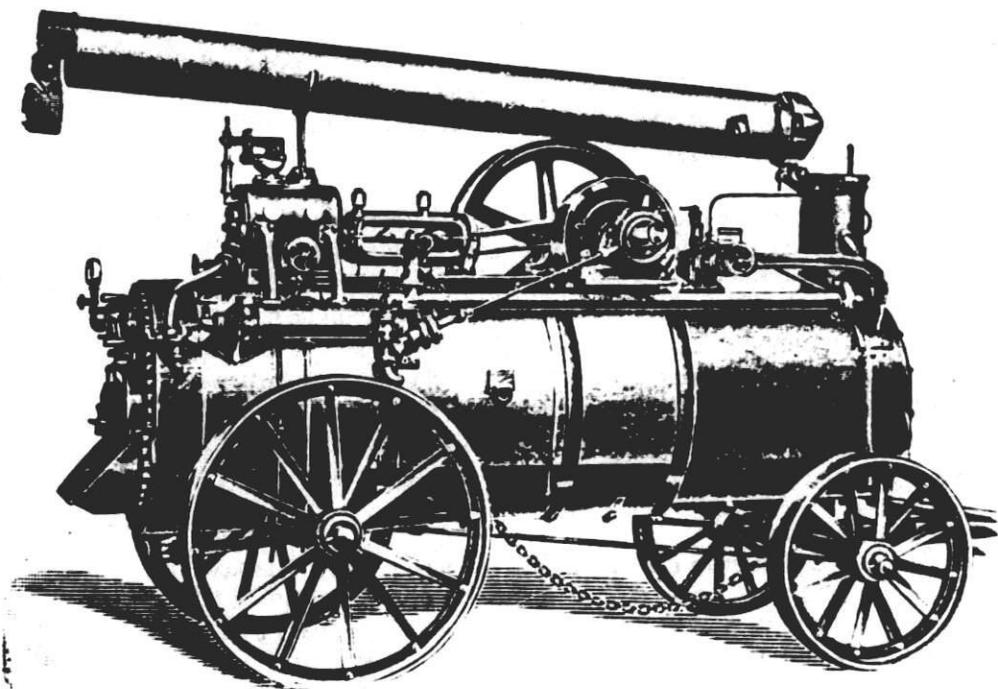
evidentemente necesaria para las máquinas de calor. Nosotros la tendremos cuando las leyes de la física sean extendidas suficientemente, para conocer anticipadamente todos los efectos del calor cuando actúa de alguna forma en cualquier cuerpo”.

En el párrafo citado, se indica que para las máquinas de calor no existe una teoría completa, de principios generales, sólidamente establecidos, aplicables bajo todas las circunstancias. Este fue y es el ideal de la física: reunirlos todo bajo una sola unidad de conceptos. Carnot se propone extender el campo de acción de la física existente, de tal forma que la máquina de calor sea por aquélla explicada; por esto las huellas de la mecánica en su teoría son profundas. Si invertimos el orden de exposición del autor, e indicamos anticipadamente la perspectiva en la cual se desarrollan sus ideas, este procedimiento esclarecerá muy bien el origen de sus presupuestos y la dirección de su búsqueda.

“De acuerdo con los principios hasta ahora establecidos, podemos comparar, con suficiente aproximación, la potencia motriz del calor con la de una caída de agua. En cada caso existe un máximo que no puede excederse, cualquiera que éste sea. De otro lado, la sustancia sobre la que opera el calor: la potencia motriz de la cascada, depende de su altura y de la cantidad de líquido; la potencia motriz del calor depende también de la cantidad de calórico. En la cascada, la potencia motriz es exactamente proporcional a la diferencia de niveles entre los recipientes alto y bajo. En la caída de calórico, la potencia motriz incrementa indudablemente con la diferencia de temperatura entre los cuerpos caliente y frío, aunque no sabemos si es proporcional a esta diferencia”.

Según se establece en este párrafo, las elaboraciones previas de Carnot permiten concluir que existen suficientes razones para considerar ambos procesos: generación de potencia motriz por cascadas o por el calor, como similares. Consideremos aquí, invirtiendo no sólo el orden de la exposición del autor, que las generalizaciones y extensiones teóricas tienden claramente a producir una estructura explicativa tal, que las máquinas funcionen similarmente.

Pensemos en el molino de trigo, movido por cascadas, de uso corriente a principios del siglo XIX, cuyo funcionamiento seguramente Carnot observó con atención. De aquella máquina, para efectos de nuestro análisis, señalaremos dos aspectos: uno externo o en el entorno, consistente en el flujo de agua desde una zona elevada y su salida por la parte baja, generando potencia motriz según la altura de la cascada y el volumen de agua. Otro aspecto interno consiste en la rueda y en su forma de operación repetitiva o cíclica, como es por excelencia su giro.



Locomotora antigua.

UN MODELO INICIAL

Para desarrollar una teoría similar, Carnot requiere de un fluido y lo encuentra en las ideas expuestas cincuenta años atrás por el fundador de la Química moderna: el calórico de Lavoisier, fluido sutil, materia del fuego, responsable de la sensación de calor, que se desplaza entre cuerpos de alta y baja temperatura para establecer un equilibrio, cuantificable en términos de la cantidad de hielo fundido a presión fija; es entonces uno de los aportes de la química en la formulación de la termodinámica. Requiere también de una "rueda"; para construirla, parte de la máquina de vapor en un proceso de refinamiento progresivo, superando fallas en los modelos previos, cual pintor que verifica en el bosquejo las posibilidades de la obra.

"Imaginemos dos cuerpos A y B conservados a temperatura constante, tales que la de A es mayor que la de B. Estos cuerpos, a los cuales podemos suministrar o retirar calor sin causar variaciones de temperatura, ejecuten las funciones de dos recipientes ilimitados de calórico. Llamaremos al primero, el horno y al segundo, el refrigerador."

Si deseamos producir potencia motriz transportando una cierta cantidad de calor desde el cuerpo A hasta el cuerpo B, debemos proceder como sigue:

1- Tomar calórico del cuerpo A para generar vapor; esto es, hacer que este cuerpo cumpla la función de un horno; o mejor, del metal que conforma el hervidor en las máquinas ordinarias, asumimos aquí que el vapor se produce a la misma temperatura del cuerpo A.

2- El vapor se recibe en un espacio capaz de expandirse, tal como un cilindro provisto con un pistón, para incrementar el volumen de este espacio y por consiguiente también se incrementa el del vapor. Así enrarecido, la temperatura cae espontáneamente, como ocurre con todos los fluidos elásticos. Admitimos que el enrarecimiento puede continuarse hasta que la temperatura sea precisamente la del cuerpo B.

3- Condensar el vapor colocándolo en contacto con el cuerpo B, y al mismo tiempo ejercer una presión constante hasta que licue completamente. El cuerpo B desempeña aquí la función del agua inyectada en las máquinas ordinarias, con la diferencia de que condensa el vapor sin mezclarse con él y sin cambiar su propia temperatura.

Los conceptos de lenguaje ordinario son materia prima de los creadores de teorías, pero aquéllos en sus manos, luego de pulidos y moldeados para que acoplen de manera armónica, adquieren significados nuevos, rigurosamente determinados. Es el caso de los cuerpos calientes y fríos que ahora se transforman en recipientes de calor, con la capacidad de recibirlo y suministrarlo, sin que por esto se modifique la temperatura. Las operaciones descritas por CARNOT las esquematizamos en la figura 1.

EL MODELO SE PRUEBA

Con un modelo a disposición, Carnot plantea de nuevo la pregunta básica:

“Es la potencia motriz invariable en cantidad, o cambia con el agente empleado para realizarla, con la sustancia intermedia seleccionada como sujeto de la acción del calor?”.

Como podemos observar, la pregunta se refiere a la sustancia de la máquina. Para concentrar el análisis en este factor, Carnot necesita establecer con precisión las condiciones externas.

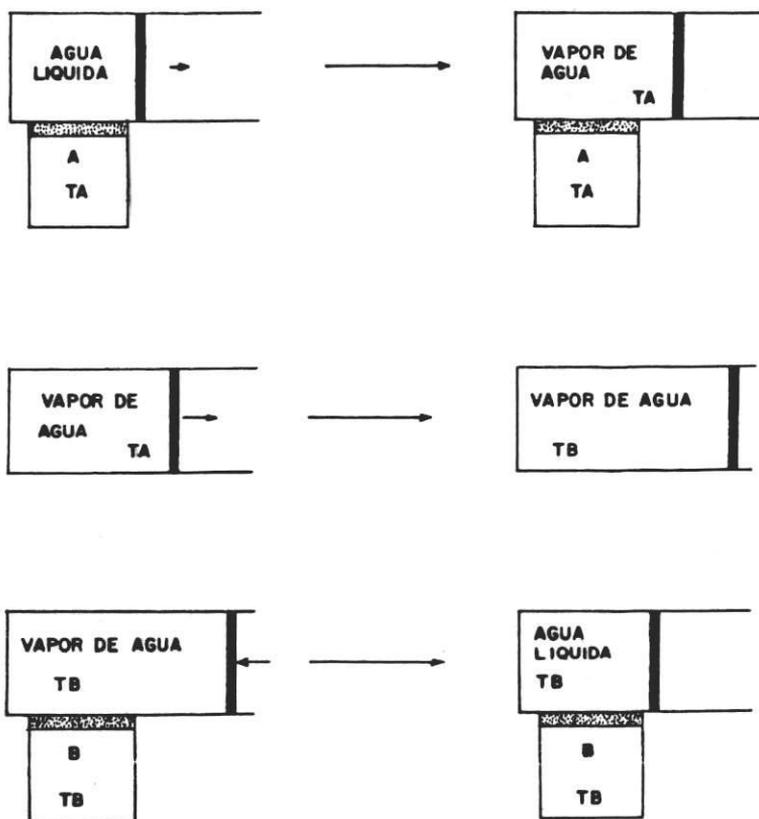


Fig. 1. Primer esbozo del ciclo de Carnot.

“Es claro que esta pregunta pueda responderse en el caso en que sean dadas, tanto la cantidad de calórico como la diferencia de temperatura. Tomamos por ejemplo un cuerpo A conservado a temperatura constante de 100 grados y otro cuerpo B conservado a temperatura de 0 grados y preguntemos qué cantidad de potencia motriz puede producirse por el paso de una porción de calórico (por ejemplo, tanto como sea necesario para fundir un kilogramo de hielo), desde el primero de estos cuerpos al segundo. Nosotros inquirimos si la cantidad de potencia motriz es necesariamente ilimitada, si varía con la sustancia empleada para realizarla, si el vapor de agua ofrece en este caso mayor o menor ventaja que el vapor de alcohol, del mercurio, un gas permanente o cualquier otra sustancia”.

Para cimentar sus argumentos, el autor necesita establecer dos condiciones previas: la primera se refiere al uso más eficiente del calórico, sin considerar, claro está, la sustancia de la máquina; la segunda se refiere a la posibilidad de invertir el sentido del proceso.

Remitámonos al viejo molino de trigo, cuyas imágenes según lo hemos establecido, sirven de base a Carnot en la elaboración de su modelo. ¿Qué indicará este dispositivo sobre el uso más eficiente de la cascada? Carnot conoce las condiciones que deben reunirse; su padre Lázaro fue un ingeniero afortunado en el ejército de Napoleón, y fue un teórico de estos asuntos. La no presencia del molino constituirá la situación más ineficiente, ya que en estas circunstancias no puede obtenerse potencia motriz. Ahora bien, si el agua cae sobre el molino, todo agente que lo frene diferente del trigo, se constituye en una pérdida. Es decir, la mayor eficiencia se obtiene cuando el agua cae sobre el molino y en éste se disminuyen al máximo las fricciones. En resumen, el funcionamiento es óptimo cuando toda la energía potencial del agua se traduce en movimiento. Para la máquina de calor, las condiciones anteriormente referidas encuentran una traducción inmediata; en este caso las condiciones de operación serán óptimas cuando todo flujo de calórico produzca movimiento (expansión), es decir, un cambio de volumen.

“Todos los cambios de temperatura no debidos a cambio de volumen de los cuerpos, son únicamente restablecimiento del equilibrio en el calórico en forma inútil”.

Qué ocurre en el molino si su forma de operación se invierte?. En estas circunstancias el dispositivo se transforma en un elevador de cangilones, de suerte que consumiendo potencia motriz, restituye el agua a su nivel original, de manera similar.

“...donde exista una diferencia de temperatura puede producirse potencia motriz. Recíprocamente, donde podamos consumir esta potencia, es posible producir una diferencia de temperatura, haciendo factible ocasionar la destrucción del equilibrio en el calórico. No son la percusión y la fricción de los cuerpos, medios actuales para elevar la temperatura, de lograr una mayor temperatura que la de los cuerpos circundantes y consecuentemente producir una destrucción del equilibrio en el calórico, donde el equilibrio existía previamente? Es un hecho probado por la experiencia que la temperatura de los fluidos gaseosos se eleva por compresión y se reduce por rarefacción”.

Establecidas las dos condiciones referidas, la potencia motriz no dependerá de la sustancia. Si así no fuera:

“... esto no sólo implicaría un movimiento perpetuo sino una creación ilimitada de potencia motriz sin consumo de calórico u otro agente cualquiera”.

Porque una máquina operando de manera que produzca potencia motriz en mayor cantidad que otra y acoplada con ésta que actúa consumiéndola en menor cantidad, restablecerá su nivel inicial el calórico que ha fluido. Aparecerá entonces, un remanente de potencia motriz sin que otra cosa ocurra ni en la máquina ni en el entorno.

OBJECIONES AL MODELO

La validez de la importantísima conclusión que Carnot ha obtenido queda en suspenso porque, como el mismo autor lo observa, su modelo presenta algunas deficiencias:

A. La argumentación precedente, que hace referencia a las máquinas acopladas y suponiendo que la potencia motriz es constante, sólo es válida si al final de la operación, las máquinas, es decir, las sustancias, se encuentran respectivamente en los mismos estados iniciales, de tal manera que las modificaciones observables se refieran al entorno. Como puede verse en la figura 1, la máquina de vapor no regresa a las condiciones de las cuales parte, ya que la temperatura final es menor que la inicial; en tales circunstancias no es de suponer que la potencia motriz sea constante, porque su pérdida o aparición sería atribuible al cambio en las condiciones de la máquina.

B. Para obviar la dificultad anteriormente anotada, es necesario restituir la máquina a las condiciones iniciales, lo cual puede obtenerse al calentar la sustancia transfiriendo calórico del recipiente A, pero este procedimiento produce una nueva dificultad: el calentamiento se constituye en una pérdida, porque sin consumo de potencia motriz

“...sería imposible realizar la operación inversa, es decir, retomar del recipiente A, el calórico empleado para elevar la temperatura del líquido.

C. Aunque no existiese la pérdida señalada anteriormente, éstas persistirían, porque en sentido estricto no habría flujo de calórico entre cuerpos a igual temperatura. Para eliminar esta dificultad, Carnot razona según el método del cálculo diferencial, de manera que las pérdidas puedan reducirse hasta hacerlas despreciables, asumiendo diferencias de temperatura entre los cuerpos, tan pequeñas como se desee, usando

“...una serie tan grande como las circunstancias lo exijan, de recipientes de calor cuyas temperaturas varíen en términos de cantidades diferenciales”.

D. La argumentación también requiere que no solo se precise la diferencia de temperatura de los recipientes de calor entre los cuales opera la máquina. Es menester, además, establecer las temperaturas de aquéllos. Sin esta precisión, la conservación de la potencia motriz no puede sostenerse.

En efecto: supongamos que las máquinas acopladas M y M' operan respectivamente entre las temperaturas TA TB y TB TA' tales que $TA > TA' > TB$; en estas condiciones, la disminución del aumento de potencia motriz sería atribuible al traslado neto de calórico del recipiente A a A'. Carnot no considera este asunto como una deficiencia en su argumentación e indica por el contrario que:

“...La potencia motriz de una cascada depende de su altura y de la cantidad de líquido, la potencia motriz del calor depende también de la cantidad de calórico usado y de la altura de su caída, es decir, de la diferencia de temperatura de los cuerpos entre los cuales se hace el intercambio de calor”.

Sin embargo, establece a continuación:

“...En las cascadas, la potencia motriz es exactamente proporcional al desnivel entre los recipientes altos y bajos. En la caída de calórico, la potencia motriz indudablemente se incrementa con la diferencia de temperatura entre los cuerpos calientes y fríos, pero no sabemos si es proporcional a ella”.

EL MODELO SE PERFECCIONA

Las mayores dificultades observadas en el modelo inicialmente propuesto, se refieren al carácter cíclico o repetitivo que Carnot no logra formular de manera satisfactoria con el vapor de agua, pero felizmente dirige sus reflexiones hacia otros resultados experimentales bien conocidos, iniciando con ello un proceso de reunión sistemática y coherente de hechos dispersos, como ya lo señalamos con anterioridad.

“Cuando un fluido gaseoso se comprime rápidamente, su temperatura se eleva. Cae, por el contrario, cuando se dilata rápidamente. Este es uno de los hechos mejor demostrados por los experimentos”.

Es corriente, en la comunidad científica, fundamentar responsablemente la información que se usa; Carnot enumera situaciones en las que el fenómeno tiene ocurrencia: encendedores neumáticos, expansiones en máquinas neumáticas, sin soslayar otras situaciones en las que el fenómeno aparece invertido; es decir, una expansión produce calentamiento, como ocurre en algunos experimentos realizados por Gavy, Lussac y Welle, sobre los cuales formula algunas hipótesis explicativas del comportamiento.

Veamos ahora cómo el autor reelabora su modelo obteniendo una máquina que gira como una rueda.

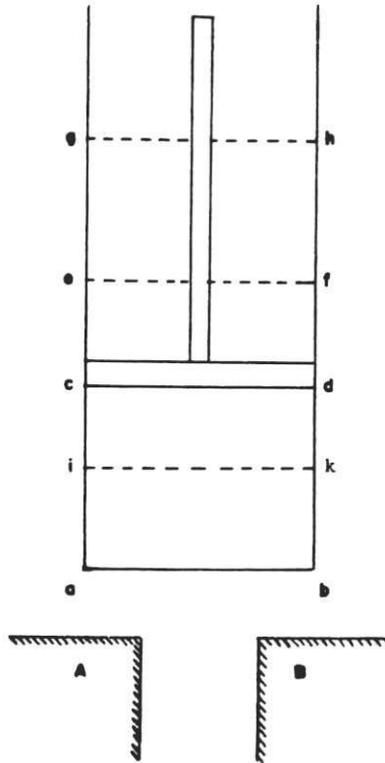


Fig. 2. Máquina de Carnot.

“...imaginemos un fluido elástico, aire atmosférico por ejemplo, colocado en un recipiente cilíndrico $abcd$ (figura 2) provisto de un diafragma o pistón móvil, cd . También se tendrán dos cuerpos A y B , conservados a temperatura constante, tales que la de A sería mayor que la de B . Imaginémonos ahora la serie de operaciones que serán descritas:

(1) Contacto del cuerpo A con el aire encerrado en el espacio $abcd$ o con las paredes de este espacio, las cuales suponemos transmiten el calórico fácilmente. El aire adquiere por tal contacto, la misma temperatura del cuerpo A ; cd es la posición actual del pistón.

(2) El pistón se eleva gradualmente y toma la posición ef . El cuerpo A permanece en contacto con el aire, el cual es así

conservado a temperatura constante durante la rarefacción. El cuerpo A provee el calórico necesario para conservar la temperatura constante.

(3) El cuerpo A se remueve, y el aire no estará más tiempo en contacto con cuerpos que suministren calórico. El pistón, entretanto, continúa el movimiento y pasa de la posición ef a la posición gh. El aire se rarifica sin recibir calórico y su temperatura cae. Imaginémonos que cae hasta que llega a ser igual a la del cuerpo B; en este instante el pistón se detiene, permaneciendo en la posición gh.

(4) El aire se coloca en contacto con el cuerpo B y es comprimido para retornar el pistón de la posición gh a la posición cd. Este aire permanece, sin embargo, a temperatura constante debido al contacto con el cuerpo B, el cual suministra su calórico.

(5) El cuerpo B se remueve y la compresión del aire se continúa; estando aislado, su temperatura aumenta. La compresión se continúa hasta que adquiere la temperatura del cuerpo A. El pistón pasa entretanto de la posición cd a ik.

(6) El aire se coloca de nuevo en contacto con el cuerpo A. El pistón retorna de la posición ik a ef; la temperatura permanece constante.

(7) La etapa descrita bajo el número (3) se repite y así sucesivamente las etapas (4), (5), (6), (3), (4), (5)...

Para visualizar el ciclo de operaciones que nos ha descrito el autor, acudamos a la representación que posteriormente hicieron Emile Clapeyron y Rudolf Clausius, en un diagrama presión-volumen y que puede observarse en la figura 3.

Las objeciones que pudiesen hacerse en torno al modelo inicial propuesto por Carnot son así superadas. Esto permite concluir en lo que denominaremos TEOREMA No. 1, el cual constituye una potente herramienta para el análisis de diferentes tipos de sustancias. Se establece, además, un rasgo característico de la termodinámica, que nace con su obra: analizar los efectos en los sistemas por la evolución del entorno.

TEOREMA No. 1

“La potencia motriz del calor es independiente de los agentes empleados para realizarla; su cantidad la fija solamente la diferencia de temperatura de los cuerpos entre los cuales se efectúa, finalmente, la transferencia de calórico”.

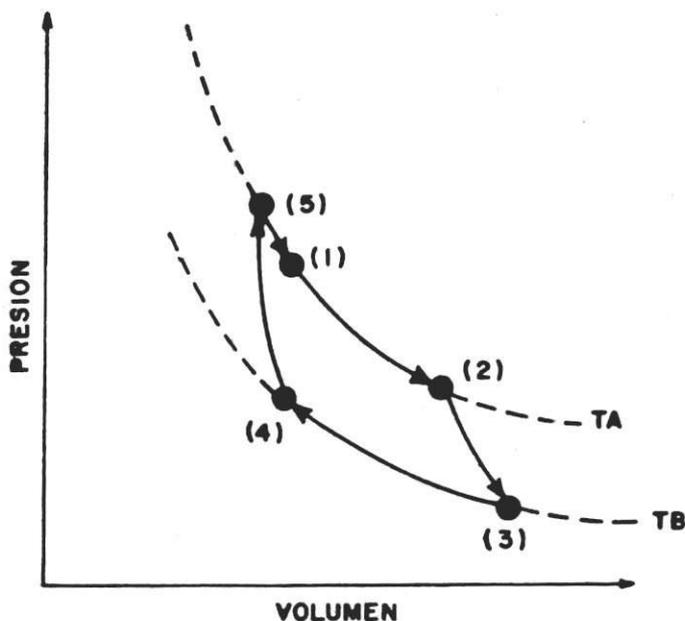


Fig. 3. Ciclo de Carnot.

EL MODELO EN ACCION

Observemos a continuación el modelo de Carnot en operación, ilustrando fenómenos hasta entonces no relacionados, anticipando nuevos resultados e indicando otras direcciones en la búsqueda.

LA MEDIDA RELATIVA DEL CALOR EN LA EXPANSION ISOTERMICA

Retomemos las operaciones descritas en la Figura 2; consideremos que se realizan repetidamente en la misma máquina con dos gases químicamente diferentes; supongamos muy pequeña la diferencia de temperatura entre los recipientes de calor A y B, muy extensas las etapas (4) y (6) de compresión y expansión isotérmicas, de tal manera que la fuerza motriz relativa a estas etapas, sea mucho mayor que la concerniente a las etapas (3) y (5), ya que se requieren compresiones o expansiones adiabáticas muy pequeñas para producir los cambios de temperatura correspondientes. En estas condiciones, la potencia motriz de la máquina será aproximadamente la diferencia entre la generada en la expansión isotérmica y la consumida en la compresión igualmente isotérmica.

Restringamos las observaciones a la etapa (6) de expansión isotérmica. Si se considera que la presión inicial de ambos gases en cuestión son semejantes, éstos producirían igual fuerza motriz, ya que la presión o fuerza expansiva, como la designa Carnot, sería igual para ambos gases en los mismos momentos del proceso, en el supuesto de que para ellos es válida la ley de Gay Lussac.

En efecto, sean X Y los dos gases, P_i y V_i la presión y el volumen inicial, entonces:

$$P_x V = K_x = P V = K_y = P_y V, \text{ es decir, } P_x = P_y$$

“Estos dos gases se comportarán en forma similar bajo las mismas circunstancias. Es decir, sus fuerzas expansivas inicialmente iguales, permanecerán siempre iguales, cualquiera que sean las variaciones de volumen y temperatura, siempre y cuando estas variaciones sean las mismas para ambos. Esto resulta obvio según las leyes de Mariotte y Gay-Lussac y Dalton, comunes a todos los fluidos elásticos”.

La argumentación precedente, es igualmente válida para la etapa (4), entonces:

“...Ya que los dos gases diferentes, a la misma temperatura y a la misma presión, se comportarán en forma similar bajo las mismas circunstancias, si los sometemos a las operaciones anteriormente descritas, ellos producirían cantidades iguales de potencia motriz”.

Si los dos gases producen la misma potencia motriz, el teorema No. 1 impone la necesidad de iguales cantidades de calórico en cada caso. Además, como el calórico absorbido en la etapa de expansión es igual al liberado en la compresión, se concluye:

TEOREMA No. 2

“La potencia motriz del calor es independiente de los agentes empleados para realizarla, Su cantidad la fija solamente la temperatura de los cuerpos entre los cuales se efectúa la transferencia de calórico”.

Las consideraciones que conducen al teorema No. 2, suscitan algunas preguntas:

¿Por qué debe simplificarse el ciclo a las etapas isotérmicas?

Es claro que el teorema No. 1 posibilita las comparaciones solamente si la máquina opera cíclicamente. A partir de la Ley de Mariotte podemos inferir la igualdad de la potencia motriz en las etapas isotérmicas, pero no se dispone de esta información para

las etapas adiabáticas. Y si los efectos en éstas no podemos considerarlos despreciables, tampoco nos es posible concluir con respecto a la potencia motriz del ciclo; por el contrario, sería la teoría de Carnot una luminosa guía.

¿Cuál es la validez de la simplificación?

Teóricamente no encontramos discusión, pero como se trata de un discurso sobre la naturaleza, será en la confrontación con la información experimental, donde se decida la respuesta. Sin embargo:

“La cantidad de calórico que los fluidos elásticos liberan o absorben en sus cambios de volumen, nunca ha sido medida por experimentos directos y no dudamos que tales experimentos serían muy difíciles”.

¡La capacidad de previsión de nuevos hechos! He aquí uno de los pilares de las argumentaciones sobre la verdadera validez de las teorías científicas. Al respecto, nos surgen nuevas e insoslayables inquietudes que son y seguirán siendo objeto de profundas reflexiones filosóficas. ¿Podrían efectuarse las mediciones experimentales independientemente del “proyecto teórico” como designa M. Herdegger a las teorías científicas? Y si algunas mediciones se aproximan a lo previsto y otras no, qué diremos de la teoría?

Ante los resultados desfavorables, argumentaríamos la no adecuación de la teoría para interpretar tales hechos, de suerte que su verdad consistiría en la no contradicción interna. Los resultados favorables son entonces visibles con antelación a la teoría. No implica esto encontrar lo que ya se sabe? No es éste el sentido de lo matemático en la ciencia experimental moderna, según Heidegger?

Volvamos a los desarrollos teóricos de Carnot recordando lo ya indicado: no existen resultados experimentales que corroboren o se opongan a sus previsiones; pero ello no puede ser un obstáculo, por el contrario, es menester vigorizar el ánimo e idear las estrategias para continuar la marcha. Veamos con qué singular maestría el autor labra el sendero.

A medida que un gas se expande isotérmicamente, debe recibir calórico; en caso contrario, se enfría. Este es un hecho experimental; entonces a mayor volumen, mayor sería el calórico; en estas circunstancias, buena medida del calórico sería el volumen.

¿Cómo variará el volumen con el calor? Exponencialmente? Linealmente? Si lo primero, no se comete gran error al considerarlo como lo segundo, siempre y cuando las variaciones de volumen sean pequeñas comparadas con los otros volúmenes. Esto es lo que Carnot supone al analizar comparativamente variaciones del aire adiabáticas, isocóricas e isobáricas.

Compresión adiabática: El autor hace uso de un resultado obtenido por Poisson a 760 milímetros de mercurio y 6 grados centígrados (G.C.) que supone igualmente válido a 0 G.C.

“...el aire atmosférico deberá elevarse un grado centigrado cuando, por compresión repentina, experimenta una reducción de volumen de $1/116$ ”.

Calentamiento isobárico:

“Calentamiento directo (de un grado) a presión constante deberá, de acuerdo con la regla de Gay-Lussac, incrementar el volumen del aire $1/267$ sobre el que tendría a 0 G.C ”.

Calentamiento Isocórico:

“Supongamos ahora que lo encerramos en un espacio invariable y que en esta condición causamos el aumento de un grado de temperatura”.

Observamos la figura (4) en la que se consigna el estado inicial del aire (1), definido por su temperatura, densidad, cantidad y tres estados finales correspondientes a los procesos anteriormente descritos.

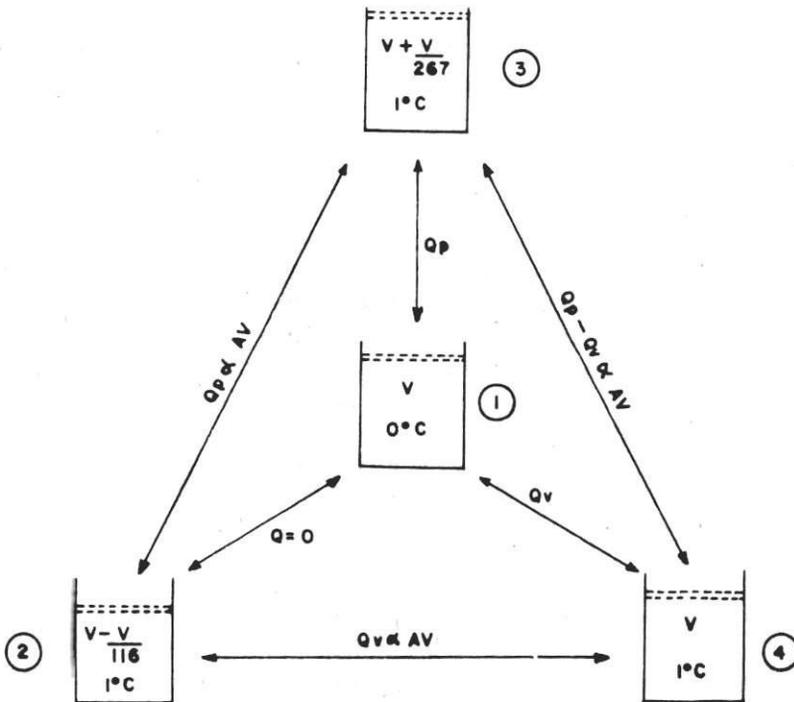


Fig. 4: Transformaciones adiabática, isobárica e isocórica del aire.

Carnot considera que el calórico es una cantidad conservativa, de manera tal que el calórico involucrado en el proceso (1) (3) que lo designamos Q_p , es igual al involucrado en el proceso isotérmico (2) (3), ya que el proceso (1) (2) es adiabático. De acuerdo con lo ya establecido, Q_p es proporcional a $(V+V/267)-(V-V/116)$. Razonando en forma similar, se concluye que Q_v , es decir, el calórico involucrado en la etapa o proceso (1) (4), es proporcional a $V/116$. Si se toma Q_p como la unidad $Q_v = 267/(267 + 116)$ aproximadamente igual a 0.7, entonces el calórico involucrado en el proceso (4) (3) (isotérmico) es: $Q_p - Q_v = 0.3$. Pero además:

“De acuerdo con las leyes de Gay-Lussac-Dalton el incremento de volumen (correspondiente al proceso (4) (3)) es el mismo para todos los otros gases, de acuerdo con el teorema demostrado (No. 2) el calor absorbido en estos incrementos de volumen es el mismo para todos los fluidos elásticos, luego:

TEOREMA No. 3

“La diferencia entre el calor específico a presión constante y el calor específico a volumen constante es el mismo para todos los gases”.

A continuación, acompañaremos a nuestro autor en una primera y breve incursión por el proceso (1) (2). El que todos los gases a iguales condiciones iniciales de volumen, presión y temperatura, requieran de una variación repentina de volumen igual para elevar un grado su temperatura, implica que todos ellos tendrán el mismo calor específico a presión constante y por consiguiente, también serán iguales los calores específicos a volumen constante; pero los experimentos de Delaroche y Berard demuestran que ello no es así. Por lo tanto, para variaciones repentinas de volumen iguales, diferentes serán las variaciones de temperatura y Carnot las calcula:

“Hemos visto que cuando el aire se somete a una compresión repentina de $1/116$ de su volumen, aumenta un grado su temperatura. Los otros gases, por una compresión similar, deben también aumentar su temperatura. Ellos deben aumentar, pero no igualmente, en relación inversa con su calor específico a volumen constante. En efecto, la reducción de volumen, al ser por hipótesis la misma, deberá ser siempre igual la cantidad de calor generada por esta reducción y en consecuencia, produciría una elevación de temperatura que dependerá solamente del calor específico adquirido por el gas después de su compresión, y evidentemente, en relación inversa con su calor específico”.

EL CALORICO Y EL VOLUMEN EN LOS PROCESOS ISOTERMICOS

¿Qué relación existe entre el calórico y el volumen? Carnot se dispone a investigar estos asuntos. Habíamos indicado con anterioridad, que al suponer una relación lineal entre el calórico y el volumen, se corren pocos riesgos si la variación de volúmenes es pequeña. ¿Pero si éste no es el caso?

Establezcamos con claridad las características de los procesos: Carnot desea comparar el calórico tomado por un gas en la expansión isotérmica, con el calórico tomado por la misma cantidad del gas a igual temperatura del caso anterior, pero partiendo de un volumen diferente; es decir, con densidades distintas, concluyendo que si la relación entre el volumen después de la expansión (o entre las densidades) con el volumen inicial es la misma en ambos casos, el calórico tomado es el mismo.

“Supongamos que el gas confinado en el espacio cilíndrico (Fig 6) se transporta de abcd al espacio a'b'c'd' de igual altura pero de diferente base y área. Este gas aumentará en volumen y disminuirá en densidad y en fuerza elástica en relación inversa de los volúmenes abcd, a'b'c'd' ”.

“Supongamos que ejecutamos con el gas confinado en a'b'c'd' las operaciones descritas anteriormente en la figura 1, bajo la suposición, también indicada anteriormente, que las etapas (4) y (6) sean mucho más extensas que las etapas (3) y (5) y que suponemos se han realizado al gas confinando en abcd. Es decir, supongamos que hemos dado al pistón c'd', movimientos iguales a los del pistón cd, que hemos hecho ocupar sucesivamente las posiciones c'd', que se corresponde con cd, y e'f' en correspondencia con ef, y que al mismo tiempo hemos sometido al gas por medio de dos cuerpos A y B a las mismas variaciones de temperatura. El esfuerzo total ejercido en el pistón será en ambos casos siempre el mismo, en instantes correspondientes. Esto se concluye únicamente de la ley de Mariotte. Como además los movimientos de los pistones tienen igual extensión, la potencia motriz producida en cada caso será evidentemente la misma”.

En efecto: Si $V = Ah$ y $V' = A'h$, $V' = VA'/A = V/K$ Según la ley de Mariotte: $PV = P'V'$, $P' = PK$

Si designamos W a la potencia motriz, en forma diferencial tendremos: $dw' = P' dv' = PK dv/K = Pdv = dw$. Queda establecido que la potencia motriz es la misma en los dos casos en los que se opera con los mismos recipientes de temperatura. En consecuencia, el teorema número 1 permite concluir:

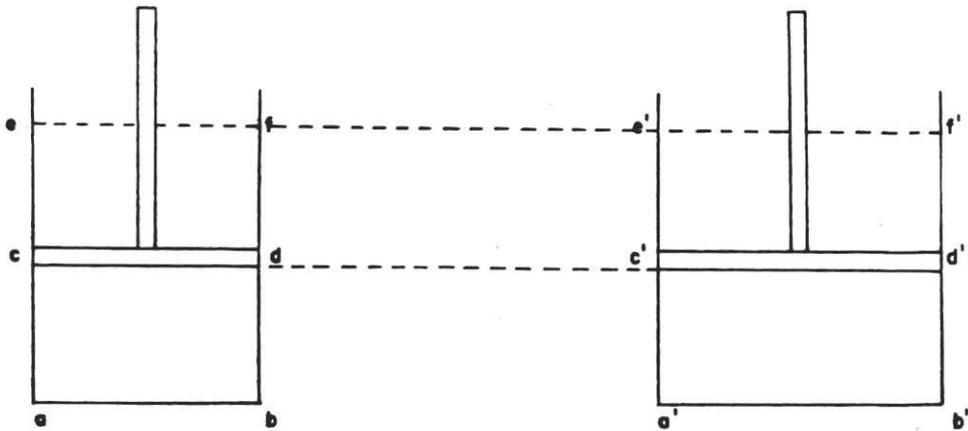


Fig. 6. Expansión isotérmica de gases.

TEOREMA 4

“Cuando un fluido elástico pasa sin cambio de temperatura desde un volumen U a un volumen V y cuando una cantidad similarmente ponderable del mismo gas, a la misma temperatura, cambia desde el volumen U' al volumen V' , si la relación de U a V es igual a la relación U' a V' , las cantidades de calor absorbido o liberado, en ambos casos son iguales”.

“Este teorema también puede expresarse como sigue: cuando un gas varía el volumen sin cambio de temperatura, las cantidades de calor absorbidas o liberadas por él están en progresión aritmética, si los incrementos o disminuciones de volumen se encuentran en progresión geométrica”.

Este teorema enunciado en su segunda forma puede confundir, porque induce a pensar que son los cambios de volumen los que varían en progresión geométrica y no los volúmenes, como se deduce a continuación:

Sean $V_1, V_2, V_3 \dots$ los volúmenes del sistema; $V_2/V_1 = r$ entonces $V_2 = V_1 r$; de igual manera $V_3 = V_2 r = V_1 r^2$ en consecuencia el volumen variaría en la forma $V_1, V_1 r, V_1 r^2$ (donde r equivale a exponencial) etc., expresión general de una progresión geométrica. El calor involucrado en el cambio de volumen de V_1 a V_2 es igual al del cambio V_2 a V_3 etc. con lo cual se concluye que éste varía linealmente.

Provisto de la consecuencia teórica enunciada en la forma del teorema número 4, Carnot se aplica al cálculo de la temperatura final del aire, luego de una compresión repentina, en la cual los cambios de volumen sean notables y ocasionen variaciones amplias de temperatura.

“Esto se encuentra realmente de acuerdo con la elevada temperatura obtenida por el aire cuando se comprime rápidamente. Sabemos que esta temperatura inflama los encendedores y en ocasiones hace al aire luminoso. Si por un momento suponemos que el calor específico es constante, no obstante los cambios de volumen y temperatura, la temperatura aumentará en progresión aritmética por reducción del volumen en progresión geométrica. Partiendo de este hecho, y admitiendo que un grado de elevación de temperatura corresponde a una compresión de $1/116$, concluiremos que el aire reducido a $1/14$ de su volumen original deberá elevarse en temperatura alrededor de 300 grados, lo cual es suficiente para inflamar un encendedor”.

El autor indica el cálculo que realiza, pero a primera vista éste no requiere ni del teorema, ni de la suposición sobre la constancia del calor específico.

“Cuando el volumen se reduce $1/116$, esto es, cuando llega a ser $115/116$ de lo que era inicialmente, la temperatura se eleva un grado. Otra reducción de $1/116$ transforma el volumen en $(115/116)^{**2}$ y la temperatura se eleva otro grado. Después de x reducciones similares, el volumen llega a ser $(115/116)^{**x}$ y la temperatura se eleva x grados. Si asumimos $(115/116)^{**x} = 1/14$; tomando logaritmos encontramos que x es aproximadamente igual a 300 grados”.

Una mentalidad tan lúcida y rigurosa como la del autor que nos ocupa, no haría tales afirmaciones si no fuesen lógicamente necesarias; pero en el texto, el discurrir de su pensamiento no ha dejado huella visible; es necesario entonces, que intentemos la reconstrucción de sus argumentos.

Observemos la figura 7, en la que se esquematiza, por etapas, una compresión repentina desde un volumen V hasta un volumen V_t y en la que además aparecen en forma reiterada los procesos ya indicados por la figura 5. Cuáles suposiciones deben hacerse para poder concluir que una compresión repentina a partir de V_1 , y que produzca un aumento de un grado, reduce el volumen a: $V_2 = (115/116)^x V_1 = 4(115/116)^{**2} x V$.

El sistema $(V, 2 \text{ grados})$, tiene con respecto a los sistemas $(V, 0 \text{ grados})$ y $(V_2, 2 \text{ grados})$ el mismo calórico: $C_v + C_v'$. Imaginemos en el proceso isotérmico de expansión a 2

CALORICO

TEMPERATURA

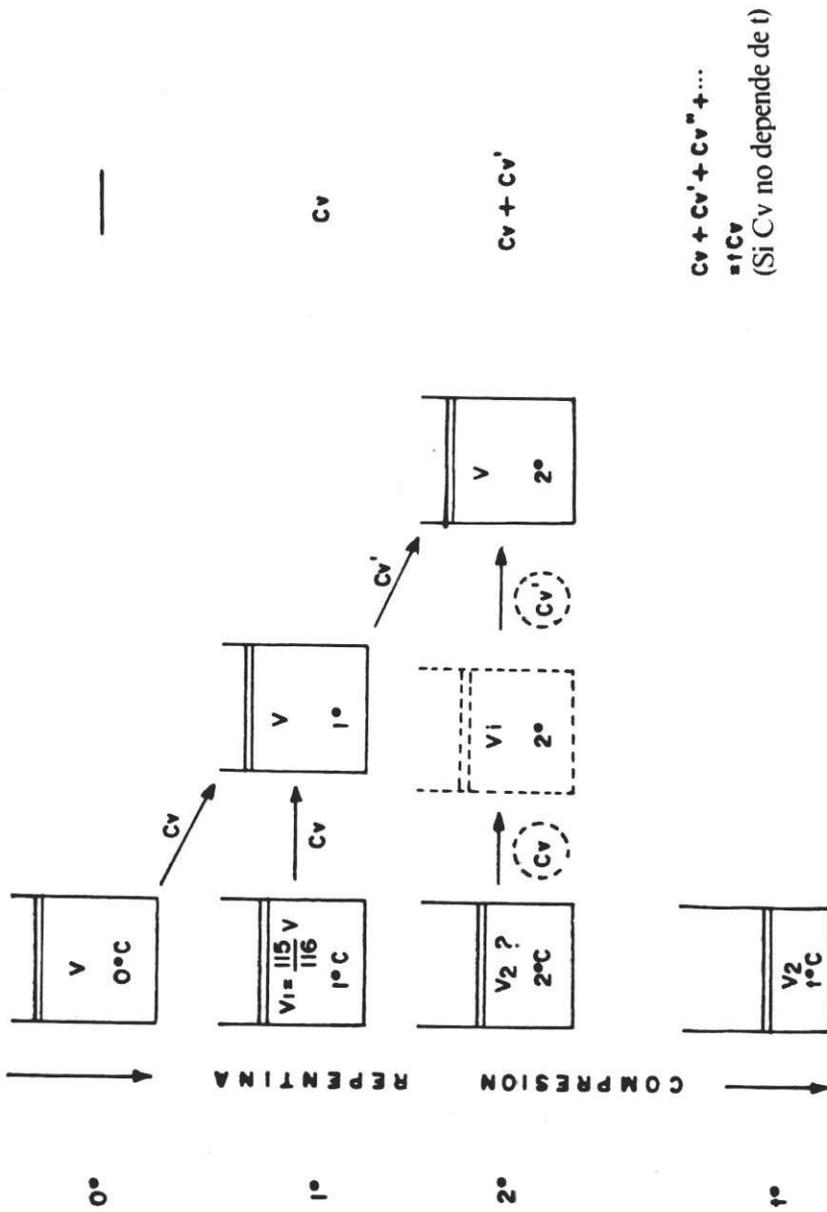


Figura 7. Compresión repentina de un gas.

grados, un volumen intermedio V_i tal que durante la expansión de V_2 a V_i el sistema tome una cantidad de calor igual a C_v ; lo cual implica que en la expansión de V_i a V tome C_v' .

Observando el proceso de calentamiento a volumen constante de 0 grados a 2 grados, si suponemos que C_v es igual a C_v' , indicamos que el calor específico no varía con la temperatura; esto a su vez implica, de acuerdo con el teorema anterior, que la relación V/V_i es igual a V_i/V_2 .

Supongamos ahora que el calor específico no se afecta por los cambios de volumen: esto implica que para calentar un grado a volumen constante el sistema (V , 1 grado) se requiere del mismo calórico que el necesario para transformar el sistema (V_1 , 1 grado) en el sistema (V_1 , 2 grados); esta cantidad es C_v' . En consecuencia V_1 es igual a V_i .

De acuerdo con las argumentaciones previas $V_2 = (115/116)^{2t} V$ por lo tanto $V_t = (115/116.0)^{2t} V$

Qué ocurriría si el calor específico depende del volumen?

“El aumento de temperatura, evidentemente, sería más considerable si la capacidad del aire, por el calor, se hace menor cuando el volumen disminuye. Esto es probable y parece que se deduce de los experimentos de Delaroche y Bérard sobre el calor específico del aire, tomado a diferentes densidades”.

En consonancia con los planteamientos anteriores, referidos a la figura 7, el sistema (V_1 , 2 grados) tendría un contenido de calórico menor que (V_i , 2 grados), lo cual implicaría que $V_i > V_1$. Si suponemos que C_v es independiente de la temperatura: $C_v = C_v'$, $V_2 = rV_i = R^{2t} V$ donde $r < 115/116$, lo que implica que $V_2 < 115/116 V_1$; es decir, se necesita realizar una compresión repentina menor para elevar la temperatura de la de 2 grados.

RELACION DE C_p Y C_v CON LA DENSIDAD

A continuación el autor inquiriere por las variaciones del calor específico cuando se modifican la temperatura y el volumen del sistema.

Para establecer de qué manera varía el calor específico con la densidad, Carnot nos invita a realizar con el gas un ciclo de operaciones algo más simplificado que el de su máquina inicial, con recipientes de temperatura A y B a t y $t-1$ respectivamente, pero sin las etapas adiabáticas, las cuales son remplazadas por etapas de calentamiento o enfriamiento, por contacto directo con los recipientes de calor.

“En un ciclo de operaciones, el cuerpo A provee al fluido elástico, una cierta cantidad de calor que puede dividirse en

dos porciones: (1) aquella que es necesaria para mantener la temperatura del fluido constante durante su dilatación; (2) aquella que es necesaria para restituir la temperatura del fluido desde la de B a la de A, luego de haber regresado el fluido a su volumen primitivo, lo colocamos en contacto con el cuerpo A. Llamaremos a la primera de estas cantidades a , y a la segunda b . El calórico total provisto por el cuerpo A será expresado por $a + b$.

El calórico transmitido por el fluido al cuerpo B puede también dividirse en dos partes: una, b' debida al enfriamiento del gas por el cuerpo B; otra, a' que abandona el gas como resultado de su reducción de volumen. La suma de estas dos cantidades es $a' + b'$; y será igual a $a + b$, después de un ciclo de operaciones, es decir: $a - a' = b' - b$.

Observemos la figura 8 en la que se esquematizan las operaciones anteriormente descritas. A continuación concluye:

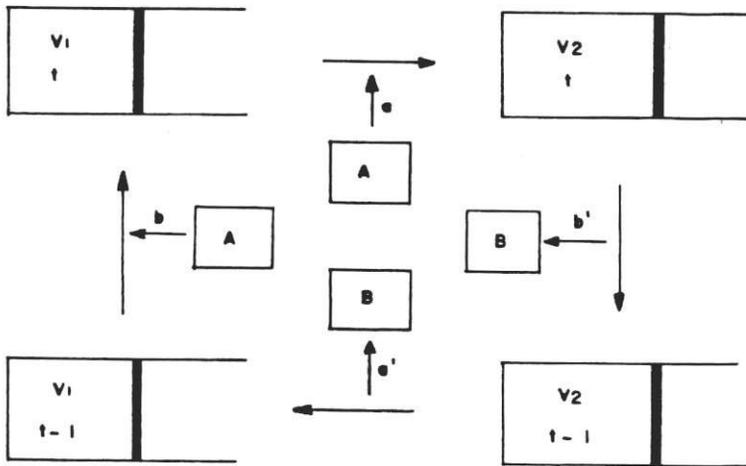


Fig. 8. Relación de capacidades calóricas con la densidad.

“De acuerdo con el teorema 4, las cantidades a y a' son independientes de la densidad del gas, siempre y cuando las cantidades ponderables sean las mismas y las variaciones de volumen sean proporcionales al volumen original. La diferencia $a - a'$ deberá llenar las mismas condiciones y en consecuencia también la diferencia $b' - b$. Pero b es el caló-

rico necesario para elevar el gas contenido en abcd (figura 2) un grado; b es el calórico liberado por el gas cuando, confinado en abef, es enfriado un grado. Estas cantidades pueden servir como medida de los calores específicos. Somos entonces conducidos al establecimiento de la siguiente proposición”.

TEOREMA 5

“El cambio en el calor específico de un gas causado por el cambio de volumen, depende enteramente de la relación entre el volumen original y el volumen alterado”.

Esta proposición también puede expresarse de manera diferente, así: Cuando un gas incrementa su volumen en progresión geométrica, su calor específico incrementa en progresión aritmética”.

La argumentación precedente a la formulación del teorema número 5 induce a confusión, ya que parece establecer comparaciones entre a y a' con base en el teorema número 4, no obstante que tales cantidades de calórico se encuentran involucradas en procesos a diferentes temperaturas. Sin duda, la brevedad de la argumentación ocasiona esta apreciación y las inquietudes en torno a la coherencia lógica de las conclusiones, se disipan si se introducen los elementos implícitos.

t	v_1	a	v_2	a_2	v_3
	b		b'		b_2
$t - 1$	v_1	a'	v_2	a_2'	v_3

FIG. 9

Observemos la figura 9 en la que se reitera el proceso descrito en la figura anterior desde el volumen V_2 a V_3 . Suponiendo, tal como lo indica Carnot, que $V_3/V_2 = V_2/V_1$ entonces $a = a_2$ y $a' = a_2'$; además $a + b = a' + b'$ y $a_2 + b' = a_2' + b_2'$. De las ecuaciones anteriores se obtiene: $b' - b = a - a'$ y $b_2' - b' = a_2 - a_2' = a - a'$; es decir $b' - b = b_2' - b'$ o que la diferencia de los calores específicos es la misma si la relación de volumen no cambia. Si designamos $b' - b = h$, entonces $b' = b + h$, $b_2' = b + 2h$, etc. En resumen:

Volumen:	v	r v	r ² v
Cv:	b	b + h	b + 2h

¿Cómo varía C_p cuando se modifica la densidad? Es la pregunta que a continuación se hace el autor. En la búsqueda de la respuesta se concentra en el efecto de la densidad sobre la diferencia entre C_p y C_v ; escuchémosle:

“¿Cuál es la causa de la diferencia entre el calor específico a volumen constante y presión constante? El calórico requerido para producir en el segundo caso el incremento de volumen. De acuerdo con la ley de Mariotte, el incremento de volumen de un gas deberá ser, para un cambio dado de temperatura, una fracción determinada del volumen original, una fracción independiente de la presión. De acuerdo con el teorema No. 4 si la relación entre el volumen primitivo y el alterado es dado, esto determina el calor necesario para producir el incremento de volumen. Ello depende solamente de esta relación y del peso del gas. Nosotros debemos concluir:”

TEOREMA No. 6

“La diferencia entre calor específico a presión constante y calor específico a volumen constante es siempre la misma, cualquiera que sea la densidad del gas, siempre y cuando el peso del gas sea el mismo”.

Observemos la figura 10, según la ley de Mariotte:

$V_1' = V_1 + V_1/267$ y $V_2' = V_2 + V_2/267$; es decir: $V_1'/V_1 = V_2'/V_2 = 268/267$; luego, aplicando el teorema número 4 se concluye que $Q_{p1} - Q_{v1} = Q_{p2} - Q_{v2}$; esta consecuencia implica que Q_p debe variar con la densidad de igual forma que Q_v para que la diferencia permanezca constante.

“Ya que la diferencia entre las dos capacidades caloríficas es constante, si una de ellas incrementa en progresión aritmética, la otra debe seguir una progresión similar: esto es, nuestra ley es aplicable a los calores específicos a presión constante”.

En las ciencias de la naturaleza es necesario cotejar permanentemente las informaciones empíricas con aquellas inferidas teóricamente, y aunque en algunos casos las primeras no hayan sido obtenidas para corroborar las elaboraciones mentales, éstas últimas entran a operar en la explicación de fenómenos ya observados”.

“Gay-Lussac y Welter han encontrado por experimentos directos... que la relación entre el calor específico a presión constante y calor específico a volumen constante varía muy poco con la densidad del gas. De acuerdo con lo que justamente hemos visto, la diferencia debe permanecer constante y no la relación. Como además el calor específico de los gases, para un peso dado, varía muy poco con la densidad, es evidente que la relación experimenta pequeños cambios”.

Complementemos en forma analítica esta argumentación.

Según el teorema número 6

$$C_{p1} - C_{v1} = K$$

$$C_{p2} - C_{v2} = K$$

Designemos:

$$n_1 = C_{p1}/C_{v1}$$

$$n_2 = C_{p2}/C_{v2}$$

Entonces

$$n_1 - n_2 = (C_{v1} + K)/C_{v1} - (C_{v2} + K)/C_{v2}$$

$$n_1 - n_2 = K(C_{v2} - C_{v1})/(C_{v2} C_{v1})$$

Por lo tanto, $(n_1 - n_2)$ es aproximadamente cero porque C_{v2} y C_{v1} son muy similares como se infiere del teorema número 5, según el cual C_v varía linealmente para cambios de volumen en progresión geométrica.

Gracias al autor, disponemos ya de una relación entre las capacidades caloríficas y la densidad. Ahora necesitamos afinar el pie en hechos empíricos y proyectar desde allí el haz luminoso de las relaciones propuestas hacia regiones aún inexploradas.

“Hemos asumido el incremento del calor específico con el volumen. Este incremento lo indican los experimentos de Delaroche y Berard: en efecto, estos físicos han encontrado el valor de 0.967 para el calor específico del aire bajo la presión de 1 m de mercurio. Tomando como unidad el calor específico del mismo peso de aire bajo la presión de 0.760m”.

Con estos dos hechos podemos realizar las inferencias para completar el siguiente cuadro:

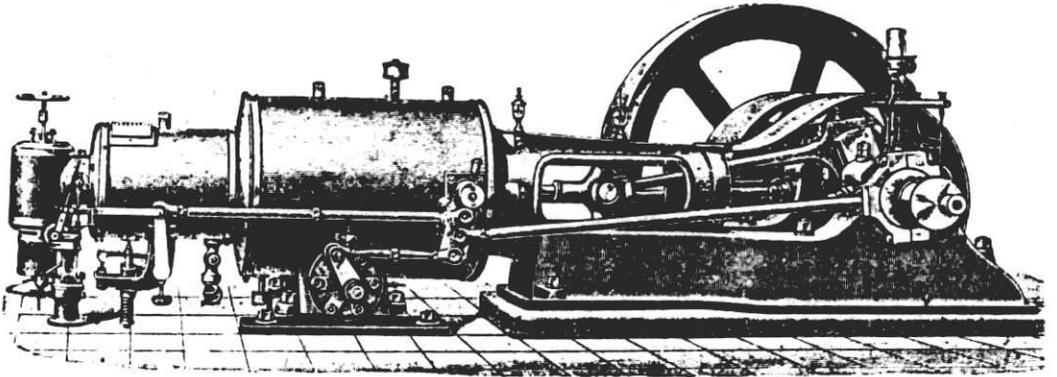
Presión: (atmf)	1/4	1/2	1	2	2 ^{**} X
Cp.	1 + 2h	1 + h	1	1 - h	1 - Xh

Si $2^{**}X = 1/0.76$ y
 $1 - Xh = 0.967$
entonces $h = 0.0835$

EL CALCULO RECTIFICADO

Guiados por el autor, hemos concluído que el calor específico varía linealmente cuando el volumen varía geoméricamente. Provistos de este resultado, calculemos de nuevo la temperatura final de un gas, luego de una compresión repentina.

Designando con los símbolos S y Z el calor y el calor específico respectivamente; los teoremas números 4 y 5 permiten establecer que: $S = A + B \text{ Los } V$ y $Z = A' + B' \text{ Log } V$. Pensemos ahora la compresión en dos etapas.



Máquina Schmidt de vapor recalentado

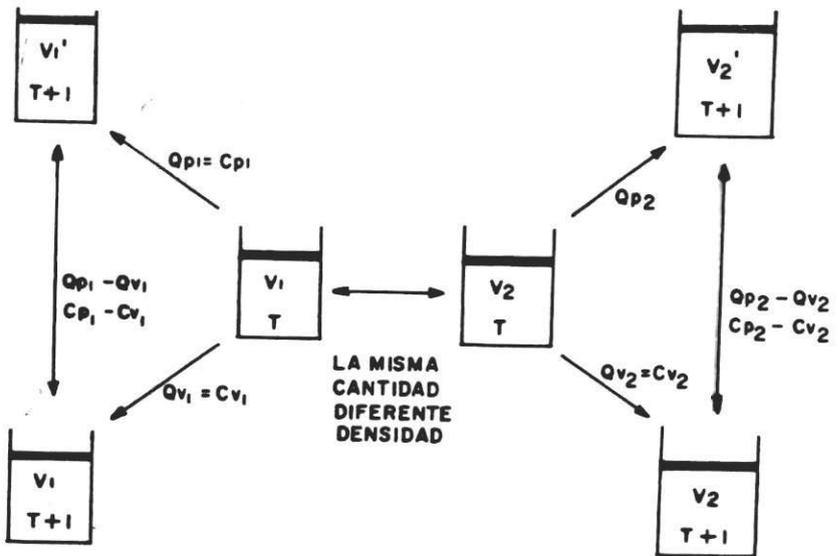


Fig. 10. Relación de capacidad calórica y densidad.

“(1) Compresión a temperatura constante; (2) restablecimiento del calórico emitido. La temperatura aumentará en la segunda operación, en relación inversa con el calor específico adquirido por el gas, luego de la reducción de volumen”.

Suponiendo que en la segunda etapa el calor específico es constante, se concluye que el incremento de temperatura es igual a la relación entre el calor y el calor específico; es decir, $At = (A + B \text{ Log } V) / (A' + B' \text{ log } V)$; sin embargo, tal como el autor lo anota:

“Grandes cambios de volumen conducen a grandes cambios de temperatura en el gas y nada prueba la constancia del calor específico a diferentes temperaturas, especialmente a temperaturas muy separadas. Esta constancia es solamente una hipótesis admitida para gases por analogía, en una cierta extensión verificada para cuerpos sólidos y líquidos a través de una parte de la escala termométrica; pero para la cual, los experimentos de Dulong y Petit han mostrado que no es adecuada si se desea extender a temperaturas por encima de 100 grados”.

¿Serán válidos los argumentos previos para calcular el aumento de temperatura al comprimir vapor de agua? Carnot establece que sí:

“De acuerdo con la ley de Clément y Desormes, una ley establecida por experimentos directos, el vapor de agua bajo cualquier presión a la que pueda formarse, contiene siempre, a pesos iguales, la misma cantidad de calor. Esto conduce a la aseveración de que el vapor comprimido o expandido mecánicamente sin pérdida de calor, se encontrará siempre saturado si así fue producido inicialmente. El vapor de agua así producido, puede entonces ser mirado como un gas permanente y debe observar todas las leyes de éste”.

Claro está que si la cantidad de calor para producir vapor saturado (calor latente de vaporización), es independiente de la temperatura y de la presión, cualquier estado de saturación es accesible en forma adiabática a partir de otro estado de saturación.

En otras palabras, un vapor saturado no puede licuarse en forma adiabática. La anterior conclusión estaría de acuerdo con la información experimental de la época, pero no con la información actual.

LA POTENCIA MOTRIZ Y LA TEMPERATURA

El primer teorema enunciado por Carnot, establece que la potencia motriz no depende de la sustancia de la máquina; sus meditaciones se dirigen a continuación, al análisis de

los factores externos. No cabe duda que la potencia motriz depende de la cantidad de calor que fluya, ya que en estas circunstancias, mayor será el desplazamiento del pistón, pero no sabemos si depende solamente de la diferencia de temperatura entre los recipientes de calor o de las temperaturas en sí.

“Imaginemos que las operaciones ilustradas en la figura 2, se efectúan sucesivamente con dos pesos iguales de aire atmosférico, pero tomadas a diferentes temperaturas. Supongamos además, que las diferencias de temperatura entre los cuerpos A y B sean iguales, de tal manera que ellos tengan por ejemplo, en uno de estos casos, las temperaturas 100 grados y 100 grado-h (siendo h muy pequeño), y en el otro 1 y 1-h. La cantidad de potencia motriz producida es, en cada caso, la diferencia entre la producida durante la dilatación y la consumida para restituir el sistema al volumen primitivo. Ahora, esta diferencia es la misma en ambos casos, lo cual se prueba fácilmente pero nos parece innecesario hacerlo; en consecuencia, la potencia motriz producida es la misma”.

Usando ecuaciones posteriormente formuladas por el autor, podemos calcular, para la máquina a 100 grados, la potencia motriz: $P.M = NRT \ln(V'/V) + NR(T - h)$
 $\ln(V'/V) = NR \ln(V'/v) \times h$, y es igual para la máquina a 1 grado C.

“El aire que nosotros primero consideramos y que ocupa el espacio abcd y con una temperatura de un grado, se puede hacer ocupar el espacio abcf a la temperatura de 100 grados, por dos caminos diferentes:

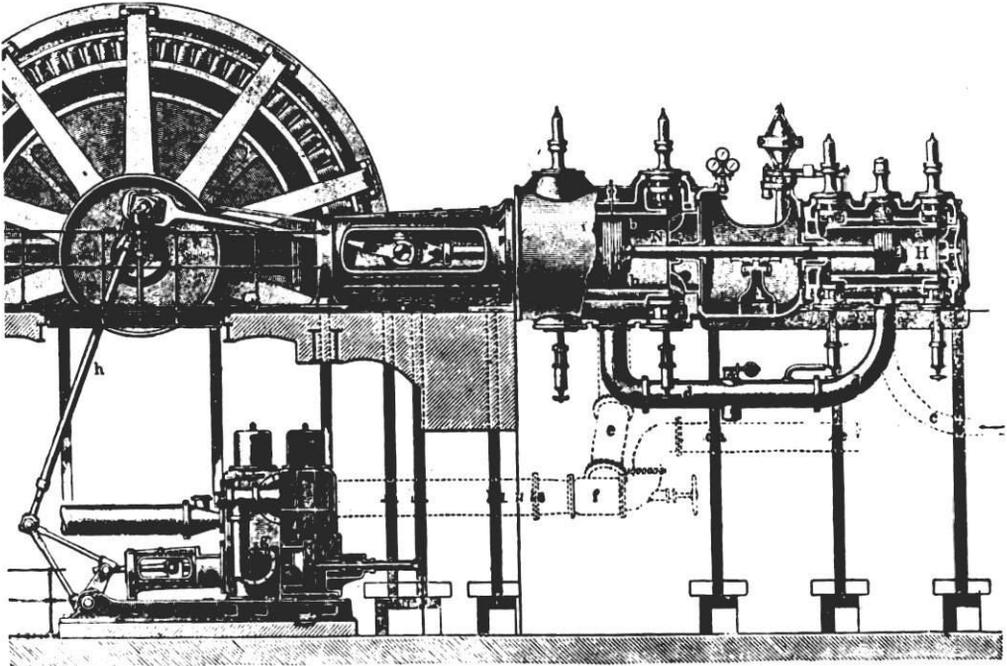
1. Podemos calentarlo sin cambiar el volumen y luego expandirlo a temperatura constante.
2. Podemos empezar por expandirlo a temperatura constante y calentarlo luego.

Denominemos a y b las cantidades de calor empleadas sucesivamente en las primeras dos operaciones, y b' y a' las cantidades de calor empleadas sucesivamente en las segundas. Como el resultado final de estas dos operaciones es el mismo, las cantidades de calor empleadas deben ser iguales. Tendremos entonces:

$$a + b = a' + b'; \quad a' - a = b - b'$$

a' es la cantidad de calor requerida para calentar desde 1 a 100 grados el gas que ocupa el espacio abef. a es la cantidad de calor requerida para calentar de 1 a 100 grados el gas que ocupa el espacio abcd.

La densidad del aire es menor en el primer caso y de acuerdo con los experimentos de Delaroche y Berard ya citados, la capacidad calorífica debe ser un poco mayor; en consecuencia b debe ser mayor que b' .



Máquina de dos cilindros en tandem

Por lo tanto, generalizando la proposición, debemos decir:

TEOREMA No. 7

La cantidad de calor debida al cambio de volumen de un gas, es mayor cuando la temperatura es mayor.

Estas cantidades desiguales de calor, producirán sin embargo, como hemos visto, iguales cantidades de potencia motriz para caídas iguales del calórico tomadas a diferentes alturas de la escala termométrica. En consecuencia, extraemos la siguiente conclusión:

TEOREMA 8

“La caída de calórico produce más potencia motriz a inferior temperatura, que a superior temperatura”.

Los procedimientos anteriormente expuestos por Carnot, podemos esquematizarlos según la figura 11.

Los razonamientos del autor, comentados con anterioridad, indican que si el volumen varía geoméricamente, el calor específico varía linealmente; sin embargo, de allí no puede inferirse que al aumentar uno, el otro disminuye. Es necesario recurrir a hechos experimentales y éstos fueron reportados por Delaroche y Berard, quienes establecen que al aumentar el volumen del aire, C_v disminuye. Pero si estos experimentadores se hubieren equivocado como posteriormente se ha establecido, las conclusiones de Carnot serán justamente contrarias.

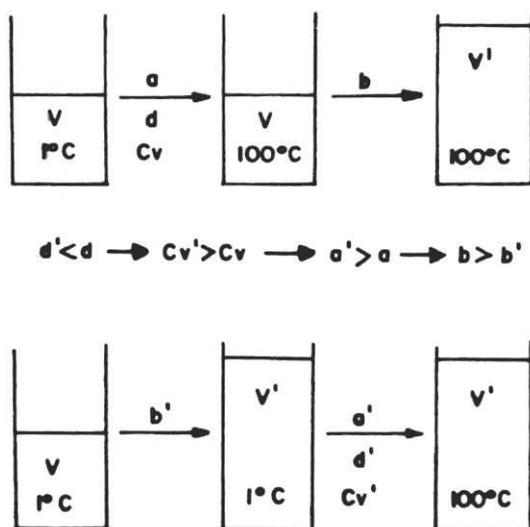


Fig. 11. Efecto de la temperatura sobre la fuerza motriz.

CONCLUSION

Carnot, ha iniciado entonces la elaboración de un modelo teórico que le permite analizar las máquinas de calor; las reglas de operación quedan claramente establecidas, y el carácter general de éstas le permitirán acercarse a cada máquina particular y decidir las condiciones que maximicen la eficiencia. Ya no serán erráticas ni aleatorias las modificaciones que se introduzcan, porque estarán guiadas por un discurso iluminador: la teoría científica que las generaciones posteriores hemos conocido con el nombre de **TERMODINAMICA**.



Nicolás Sadi Carnot. París 1796-1832