

A decorative graphic consisting of several thick, curved brush strokes in red and blue, arranged in a circular pattern around the title text.

# EL FRIGORÍFICO DE EINSTEIN

---

CÓMO EL **FRÍO** Y  
EL **CALOR** EXPLICAN  
EL UNIVERSO

---

PAUL SEN

PAIDÓS

**PAUL SEN**

# **EL FRIGORÍFICO DE EINSTEIN**

---

Cómo el frío y el calor  
explican el universo

Traducción de Ana Pedrero Verge

**PAIDÓS Contextos**

Título original: *Einstein's Fridge* de Paul Sen  
Publicado originalmente en inglés por Scribner, un sello de Simon & Schuster, Inc., 2021

1.<sup>a</sup> edición, octubre de 2022

No se permite la reproducción total o parcial de este libro, ni su incorporación a un sistema informático, ni su transmisión en cualquier forma o por cualquier medio, sea éste electrónico, mecánico, por fotocopia, por grabación u otros métodos, sin el permiso previo y por escrito del editor. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual (Art. 270 y siguientes del Código Penal). Dirijase a CEDRO (Centro Español de Derechos Reprográficos) si necesita fotocopiar o escanear algún fragmento de esta obra. Puede contactar con CEDRO a través de la web [www.conlicencia.com](http://www.conlicencia.com) o por teléfono en el 91 702 19 70 / 93 272 04 47.

© Furnace Limited, 2021  
© de la traducción, Ana Pedrero Verge, 2022

© de esta edición,  
Editorial Planeta, S. A., 2022  
Paidós es un sello editorial de Editorial Planeta, S. A.  
Avda. Diagonal, 662-664  
08034 Barcelona, España  
[www.paidos.com](http://www.paidos.com)  
[www.planetadelibros.com](http://www.planetadelibros.com)

ISBN 978-84-493-4002-4  
Maquetación: Pleca Digital, S. L. U.  
Depósito legal: B. 14.038-2022  
Impresión y encuadernación en Huertas Industrias Gráficas, S. A.

Impreso en España – *Printed in Spain*



# SUMARIO

<i>Prólogo</i> . . . . .	11
1. De visita en Gran Bretaña . . . . .	15
2. La potencia motriz del fuego . . . . .	23
3. El precepto del Creador . . . . .	41
4. El valle del Clyde . . . . .	53
5. El problema principal de la física . . . . .	63
6. El flujo del calor y el fin de los tiempos . . . . .	75
7. Entropía . . . . .	87
8. El movimiento al que llamamos calor . . . . .	101
9. Colisiones . . . . .	111
10. Contar las formas . . . . .	125
11. «El nimbo terrorista» . . . . .	149
12. El cerebro de Boltzmann . . . . .	165
13. Cuantos . . . . .	173
14. Azúcar y polen . . . . .	187
15. Simetría . . . . .	201
16. La información es física . . . . .	217
17. Demonios . . . . .	241
18. Las matemáticas de la vida . . . . .	255
19. El horizonte de sucesos . . . . .	279
<i>Epílogo</i> . . . . .	305
<i>Agradecimientos</i> . . . . .	311

<i>Apéndice I: El ciclo de Carnot</i> . . . . .	313
<i>Apéndice II: Cómo Clausius concilió la conservación de la energía con las ideas de Sadi Carnot</i> . . . . .	321
<i>Apéndice III: Las cuatro leyes de la termodinámica</i> . . . . .	327
<i>Notas</i> . . . . .	329
<i>Bibliografía</i> . . . . .	357
<i>Índice analítico</i> . . . . .	363

# CAPÍTULO 1

---

## De visita en Gran Bretaña

Es un prodigio cómo se ha multiplicado el número de máquinas de vapor.

JEAN-BAPTISTE SAY, economista y empresario francés, en su visita a Gran Bretaña

El 19 de septiembre de 1814, Jean-Baptiste Say,<sup>1</sup> empresario y economista francés de cuarenta y siete años, se embarcó en una misión de espionaje de diez semanas con destino a Gran Bretaña. Napoleón había sido desterrado a la isla mediterránea de Elba tres meses antes, y el bloqueo comercial entre Francia y su vecina norteña se había levantado. El nuevo gobierno de París vio en ello una oportunidad para investigar las razones que apuntalaban el reciente crecimiento económico de Gran Bretaña y encontró al hombre perfecto. Durante su adolescencia, Jean-Baptiste Say vivió dos años en Gran Bretaña, donde trabajó en las oficinas de varias empresas comerciales británicas y aprendió a hablar un inglés fluido. Más tarde gestionó una fábrica textil en el norte de Francia y publicó libros como economista, lo que le había permitido adquirir un dominio práctico y teórico del comercio.

A pesar de ser una misión de espionaje, esta no fue ni peligrosa ni clandestina. En ningún momento Say ocultó los motivos que lo llevaron a Gran Bretaña. Como anglófilo sociable, cruzó todo el país obteniendo acceso a minas, fábricas y puertos y, en su tiempo libre, acudía

a teatros y casas de campo. Habían transcurrido veintiséis años desde la última vez que había estado, y Say se encontró con un país transformado. Empezó su viaje en Fulham, un pueblo al oeste de Londres donde había pasado algún tiempo en su juventud. Estaba irreconocible. Había casas nuevas por todas partes, y el prado por el que paseaba años atrás se había convertido en una calle llena de tiendas. En opinión de Say, la metamorfosis de Fulham era representativa de lo que le había ocurrido al país en su conjunto durante el siglo XVIII. La población de Gran Bretaña se había disparado,<sup>2</sup> pasando de seis a nueve millones de personas, y sus habitantes se habían convertido en los mejores alimentados, vestidos y pagados de Europa. El comercio también había prosperado; no le pasó desapercibido que la cantidad de barcos en el puerto de Londres se había triplicado y ahora el número de embarcaciones era de tres mil. En otras partes del país admiraba los nuevos canales y las calles de las ciudades iluminadas con luz de gas. Visitó una fundición en la que se fabricaban componentes para coches en Birmingham, una fábrica de hilado textil de siete plantas en Manchester, minas de carbón cerca de York y Newcastle, y un molino de algodón con motores a vapor en el que se fabricaban tejidos de algodón en Glasgow. Su dueño, un tal Finlay, estaba tan orgulloso de aquellas máquinas y tan poco preocupado por la idea de que los franceses pudieran hacerle la competencia que él mismo le enseñó a Say cómo funcionaban.

El motor del milagro económico de Gran Bretaña era la industria del algodón, cuyo valor de exportación se había multiplicado por 25<sup>3</sup> entre la primera visita de Say en la década de 1780 y su segunda visita en la década de 1810. En Francia eran muchos, incluidos los que habían aconsejado a Napoleón, quienes creían que la mejor forma de emular aquel crecimiento era construyéndose un imperio; después de todo, Gran Bretaña tenía acceso al algodón virgen barato que obtenía de sus colonias. Say no estaba de acuerdo. Creía que el colonialismo era poco rentable<sup>4</sup> a largo plazo y consideraba que la innovación tecnológica era la clave del éxito británico. Y hubo un instrumento en concreto que le llamó la atención y cautivó su imaginación.

«Es un prodigio cómo se ha multiplicado el número de máquinas de vapor por todas partes. Hace treinta años, solo había dos o tres en

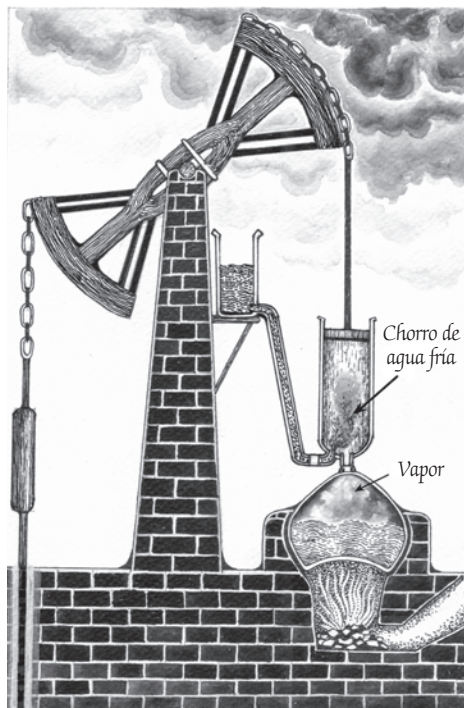
Londres, y ahora hay miles [...] La actividad industrial ya no se puede sostener de forma rentable sin su potente ayuda.»<sup>5</sup>

Lo que más había revolucionado la máquina de vapor era la industria minera británica. Las minas, como los pozos de agua, son huecos que se cavan en el suelo y son propensos a las inundaciones. Las bombas a caballo preindustriales no acababan de lograr sacar el agua de las minas que tuvieran varios metros de profundidad. Además, hacía falta una finca de unos 8.000 m<sup>2</sup> para alimentar a un caballo durante un año,<sup>6</sup> y en Gran Bretaña no se disponía de una extensión de pastoreo suficiente para alimentar a los caballos que exigiría el aumento de la minería. Pero para 1820, la tecnología de vapor había avanzado hasta el punto de que los motores bombeaban fácilmente el agua de agujeros de unos trescientos metros de profundidad,<sup>7</sup> lo que abarató el coste de la extracción de carbón. Y, a su vez, dado que el carbón es un ingrediente crucial para fabricar hierro, hizo que este también fuera más abundante. Entre 1750 y 1805, la producción de hierro se multiplicó por nueve, pasando de 28.000 a 250.000 toneladas anuales.<sup>8</sup>

En la Gran Bretaña de principios del siglo XIX, las máquinas de vapor eran omnipresentes, pero no tan innovadoras como creía Say. Si esta tecnología había proliferado no era porque los británicos fueran especialmente ingeniosos, sino porque su país era tan rico en carbón que incluso los motores mal diseñados y derrochadores resultaban rentables. Fijémonos, por ejemplo, en la que se instaló en la mina de Caprington en el suroeste de Escocia en 1811 y que funcionaba a partir de un principio que un inventor inglés llamado Thomas Newcomen había concebido un siglo antes. Los dispositivos de este tipo no eran lo que ahora, en el siglo XXI, consideramos una máquina de vapor, en la que la presión que ejerce el vapor caliente mueve un pistón. Es mejor entenderlos como un motor de vacío a base de vapor, en el que la relación entre el calor que se genera en la caldera y el trabajo mecánico que ejecuta es enrevesado e ineficiente.

Los «motores de Newcomen» funcionan de la siguiente manera: el calor que se genera al quemar carbón crea un vapor que fluye por una válvula de entrada por un gran cilindro en el que un pistón se puede





Motor de Newcomen

mover hacia arriba y hacia abajo. Inicialmente, el pistón descansa en la parte superior del cilindro. En cuanto el cilindro está lleno de vapor, la válvula de entrada se cierra. Se suelta un chorro de agua sobre el cilindro, lo que enfría el vapor del interior y hace que se condense en forma de agua. Y, dado que el agua ocupa mucho menos espacio que el vapor, se crea un vacío parcial bajo el pistón. El aire atmosférico siempre intentará llenar cualquier hueco, y aquí la única forma que tiene de hacerlo es empujando el pistón hacia abajo. He aquí la fuente de la potencia del motor. El vapor es un medio que se usa para crear un vacío, y es la presión hacia abajo que ejerce la atmósfera la que hace todo el trabajo.

Para observar este efecto, vierte un poco de agua en una lata de refresco vacía y caliéntala hasta que esté llena de vapor. Toma precauciones de seguridad y coge la lata con unas pinzas —porque se calentará— y dale la vuelta rápidamente al tiempo que la sumerges en un bol con agua muy fría. El vapor se condensa, convirtiéndose en agua y creando así un vacío parcial en el interior de la lata. Entonces, la presión de la atmósfera terrestre aplastará la lata.

En la máquina de vapor de la que hablaba, este proceso —llenar el cilindro con vapor y condensarlo para que se convierta en agua y se cree un vacío parcial— se repite una y otra vez. Así, el pistón sube y baja y hace que la bomba funcione.

Los motores de Newcomen consumían cantidades ingentes de carbón.<sup>9</sup> Necesitaban una fanega —unos 40 kg— de carbón para levantar entre 2 y 4 millones de kilos de agua una altura de un pie. La cantidad de agua que se podía elevar un pie por cada fanega consumida recibía el nombre de *capacidad* del motor. Según los parámetros actuales, aquellos motores eran extremadamente ineficientes, ya que malgastaban cerca del 99,5 % de la energía térmica que emitían al quemar el carbón.

Si unos motores tan derrochadores siguieron empleándose durante más de un siglo fue porque el carbón era barato. En el momento en que Say visitó Gran Bretaña, las minas del país producían dieciséis millones de toneladas al año,<sup>10</sup> y en las nuevas ciudades industriales de Leeds y Birmingham, la tonelada de carbón solía venderse por menos de diez chelines.<sup>11</sup> A un precio como aquel, poco importaba que el diseño del motor fuera deficiente.

Más tarde, en 1769, el ingeniero escocés James Watt patentó una modificación del motor de Newcomen<sup>12</sup> que llegaba casi a cuadruplicar su capacidad.<sup>13</sup> Sin embargo, paradójicamente, la llegada de los diseños de Watt frenó la innovación británica durante treinta años,<sup>14</sup> ya que él y su socio Matthew Boulton utilizaron el sistema de patentes para evitar que otros ingenieros sacaran nuevas mejoras al mercado. En aquella época, igual que ahora, el éxito comercial no siempre iba de la mano de la innovación.

Además, los ingleses tenían una relación de amor-odio con la ciencia.<sup>15</sup> Por un lado, en el siglo XVIII, la creciente clase media del país había desarrollado un gran interés por la filosofía natural, que era el nombre con el que se conocía a la ciencia. Las enciclopedias eran libros superventas. La gente acudía en masa a conferencias abiertas al público sobre cuestiones como el comportamiento de los imanes o los últimos descubrimientos astronómicos. Surgían clubes que organizaban encuentros informales para hablar de ciencia. El más famoso pasó a ser conocido como la Sociedad Lunar, entre cuyos miembros se encontraban Watt y Boulton. Pero, por otro lado, algunos sectores del

público recelaban de la ciencia porque muchos de sus practicantes, como Joseph Priestley, el descubridor del oxígeno, prestaba apoyo público a las ideas políticas radicales de la revolución industrial. Pagó un precio muy elevado por sus opiniones, ya que en 1791 una multitud furiosa incendió su casa y su laboratorio.

En aquella época, las dos universidades de Inglaterra, Oxford y Cambridge,<sup>16</sup> no impartían ningún curso en campos que se asemejaran a la física y a la ingeniería modernas. Cambridge, como *alma mater* de Isaac Newton, formaba exhaustivamente a sus alumnos en los principios matemáticos descubiertos por el gran científico. Pero confiados en el legado de Newton, los profesores de su universidad no creían que fuera necesario ampliar su trabajo y miraban con recelo a las nuevas técnicas matemáticas<sup>17</sup> que se estaban desarrollando en otros países. En 1806, cuando el académico progresista Robert Woodhouse imploró que se adoptara el estilo europeo matemático, la revista conservadora *Anti-Jacobin Review* lo censuró por considerarlo antipatriota.<sup>18</sup> Las aplicaciones prácticas de las matemáticas tampoco se consideraban prioritarias. Sí, las leyes de Newton describían aspectos del universo que habitamos como las órbitas de los planetas, pero los catedráticos de Cambridge eran de la opinión de que el propósito de enseñar dichas leyes era formar la mente de los estudiantes procedentes de familias terratenientes cuyo futuro pasaba por servir a la Iglesia, al Estado y al imperio. A pesar de las protestas de los alumnos, todavía pasarían décadas antes de que la Universidad de Cambridge cambiara de enfoque.

Mientras tanto, en Francia las cosas eran diferentes.

Jean-Baptiste Say publicó sus observaciones sobre la transformación económica e industrial de Gran Bretaña en un libro titulado *De l'Angleterre et des Anglais* en 1816. Su informe, junto a otros, convenció a los ingenieros, empresarios y políticos franceses de que la forma de alcanzar el nivel económico de Gran Bretaña era explotar la máquina de vapor. Pero tenían un problema: al sur del canal de la Mancha, el carbón escaseaba. Las minas francesas producían un millón de toneladas anuales, y dado que la mayoría se encontraban en la remota región de Languedoc, el precio jamás bajaba de los veintiocho cheli-

nes por tonelada,<sup>19</sup> tres veces más caro que en el núcleo industrial de Inglaterra. Por eso, desde las primeras fases de la industrialización del país, los ingenieros franceses se preocuparon por la eficiencia de sus motores —cómo maximizar el trabajo útil que se puede extraer del consumo de una cantidad concreta de carbón— en un sentido al que sus homólogos británicos no daban tanta importancia.

La educación científica y matemática francesa también era muy distinta de la que se impartía en Gran Bretaña, como demuestra la institución en la que Say se convirtió en profesor de Economía Industrial tres años después de regresar a su patria. El Conservatorio Nacional de Artes y Oficios,<sup>20</sup> tal como lo llamaron, estaba muy lejos de las instituciones de élite como Cambridge. Ubicado en París, el Conservatorio se creó como consecuencia del compromiso que el gobierno francés revolucionario contrajo con la educación pública, y representaba la convicción del régimen de que la ciencia y las matemáticas eran armas en una guerra contra la superstición<sup>21</sup> y el privilegio aristocrático arbitrario. Proporcionaban leyes racionales que ayudarían a fundar una sociedad racional. Más adelante, Napoleón siguió prestando su apoyo a estos campos, pues los creía importantes para las ambiciones militares de Francia. Partiendo de esta base, los científicos franceses veían en la obra de Newton unos cimientos sobre los que seguir construyendo. Ampliaron su alcance y la simplificaron sobremedida. En lugares como el Conservatorio, era natural pensar que el análisis matemático podía aplicarse a las máquinas de vapor y, en concreto, a su eficiencia.

Y fue ahí donde un joven estudiante estableció los cimientos de la ciencia de la termodinámica.