

¿POR QUÉ
a los
PATOS
no SE LES
ENFRÍAN
los **PIES?**

LA FÍSICA *de lo* COTIDIANO



PAIDÓS

HELEN CZERSKI

¿POR QUÉ A LOS PATOS NO SE LES ENFRÍAN LOS PIES?

La física de lo cotidiano

Traducción de Ana Pedrero Verge

Título original: *Storm in a Teacup: The Physics of Everyday Life*, de Helen Czerski
Publicado originalmente en inglés por Penguin Random House UK

Traducción de Ana Pedrero Verge

1.^a edición, abril de 2017

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). Diríjase 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 o por teléfono en el 91 702 19 70 / 93 272 04 47.

© Helen Czerski, 2016

© de la traducción, Ana Pedrero Verge, 2017

© de todas las ediciones en castellano,

Espasa Libros, S. L. U., 2017

Avda. Diagonal, 662-664. 08034 Barcelona, España

Paidós es un sello editorial de Espasa Libros, S. L. U.

www.paidos.com

www.planetadelibros.com

ISBN: 978-84-493-3323-1

Fotocomposición: gama, sl

Depósito legal: B. 5.712-2017

Impresión y encuadernación en Huertas Industrias Gráficas, S. A.

El papel utilizado para la impresión de este libro es cien por cien libre de cloro y está calificado como papel ecológico.

Impreso en España – *Printed in Spain*

Sumario

Introducción	13
1. Palomitas y cohetes. Las leyes de los gases.	25
2. Todo lo que sube, baja. La gravedad	55
3. La belleza de lo pequeño. La tensión superficial y la viscosidad	83
4. Un momento en el tiempo. La marcha hacia el equilibrio. . .	113
5. Creando olas. Del agua al wifi	141
6. ¿Por qué a los patos no se les enfrían los pies? El baile del átomo	175
7. Cucharas, espirales y Sputnik. Las reglas del girar	207
8. Cuando los opuestos se atraen. Electromagnetismo	237
9. Cuestión de perspectiva	279
<i>Referencias bibliográficas</i>	303
<i>Agradecimientos</i>	313
<i>Índice analítico y de nombres</i>	317

Palomitas y cohetes

Las leyes de los gases

Las explosiones en la cocina suelen ser una mala idea. Sin embargo, a veces, una pequeña explosión puede alumbrar algo delicioso. Un grano de maíz seco contiene muchos componentes alimenticios buenos —carbohidratos, proteínas, hierro y potasio—, pero están muy comprimidos, además de protegidos por una cáscara blindada. El potencial es prometedor, aunque para que ese grano sea comestible es preciso aplicarle una reorganización extrema. La explosión es el broche de oro y, muy oportunamente, ese grano contiene la semilla de su propia destrucción. Anoche me metí a hacer cocina balística, es decir, palomitas. Siempre es reconfortante descubrir que un exterior duro y hostil puede albergar un interior más dócil; pero ¿por qué en este caso el contenido se convierte en un copo blandito en lugar de explotar en mil pedazos?

Cuando el aceite de la sartén estuvo caliente, añadí una cucharada de granos, puse la tapa y los dejé ahí mientras hervía agua para prepararme un té. Afuera, la tormenta bramaba, y grandes gotas de agua golpeaban la ventana. El maíz silbaba suavemente en el aceite. Me miraba como si no estuviera pasando nada, pero, en la sartén, la función ya había empezado. Cada grano de maíz contiene un germen, que es el comienzo de una nueva planta, y el endosperma, que sirve de alimento para esa nueva planta. El endosperma está compuesto de almidón envasado en gránulos, y contiene un 14 % de agua. Mientras

los granos estaban en el aceite caliente, esa agua empezó a evaporarse, convirtiéndose en vapor. Las moléculas calientes se mueven más rápido, así que cada vez que un grano se calentaba, aumentaba la cantidad de moléculas de agua que zumbaban por el interior en forma de vapor. El propósito evolutivo de la cáscara de un grano de maíz es resistir a los ataques del exterior, pero ahora había una rebelión en su interior que hacía las veces de olla exprés en miniatura. Las moléculas de agua que se habían convertido en vapor se encontraban atrapadas y no tenían forma de escapar, por lo que la presión aumentaba en el interior. Las moléculas de gas no cesaban de colisionar entre ellas y con las paredes del recipiente, y al aumentar la cantidad de moléculas de gas y la velocidad a la que se movían, hacían cada vez más ruido en el interior de la cáscara.

Las ollas exprés van muy bien porque el vapor caliente es de lo más efectivo a la hora de cocinar, y lo mismo ocurre en el interior de las palomitas. Mientras buscaba una bolsita de té, los gránulos de almidón se estaban convirtiendo en una sustancia gelatinosa presurizada y la presión seguía aumentando. La cáscara externa de un grano de maíz puede soportar este estrés, pero solo hasta cierto punto. Cuando la temperatura se acerca a los 180 °C en el interior y la presión es casi diez veces superior a la presión normal del aire, esa sustancia viscosa ya roza la victoria.

Sacudí un poco la sartén y oí la primera explosión sorda proveniente del interior. Tras unos segundos, sonó como si estuvieran disparando una ametralladora en miniatura, y vi como la tapa se levantaba con cada golpe que recibía desde el interior. Cada explosión traía consigo además una bocanada impresionante de vapor que salía por debajo de la tapa de la sartén. Dejé todo un momento para servirme el té y, en ese preciso instante, el tumulto del interior movió la tapa y los copos empezaron a volar por los aires.

En momentos de catástrofe, las reglas cambian. Hasta ese instante, una cantidad fija de vapor de agua se encuentra confinada, y la presión que ejerce en el interior de la cáscara aumenta a medida que sube la temperatura. Pero cuando la cáscara dura finalmente sucumbe, el interior queda expuesto a la presión atmosférica de la sartén y

ya no se topa con limitaciones de volumen de ningún tipo. La masa de almidón viscoso sigue llena de moléculas calientes en movimiento, pero ya nada ofrece resistencia desde el otro lado. Así que se expande de forma explosiva hasta que la presión interior coincide con la exterior. La masa blanca compacta se convierte entonces en un copo expansivo, espumoso y blanco, dando la vuelta por completo al grano; y al enfriarse, se solidifica. La transformación se ha consumado.

Al retirar las palomitas descubrí algunas víctimas que no habían sobrevivido. Granos oscuros, quemados y sin abrir tamborileaban tristes en el fondo de la sartén. Si la cáscara exterior está dañada, el vapor de agua escapa al calentarse, así que la presión no llega a aumentar. La razón por la que el maíz explota y otros cereales no lo hacen es que las cáscaras de los demás son porosas. Si un grano está demasiado seco —quizás porque no fue cosechado en el momento idóneo—, no contiene el agua suficiente para provocar la presión que se necesita para romper la cáscara. Sin la violencia de la explosión, el maíz incomedible sigue siendo incomedible.

Me llevé el té y el bol de palomitas perfectamente cocinadas a la ventana y observé la tormenta. La destrucción no tiene por qué ser siempre mala.

Lo sencillo es bello. Y esta belleza es todavía más satisfactoria cuando se ha condensado a partir de algo complejo. Para mí, las leyes que nos explican el comportamiento de los gases son como una de esas ilusiones ópticas que te hacen creer que estás viendo algo concreto, pero que, cuando parpadeas y vuelves a mirar, ves que es algo completamente distinto.

Vivimos en un mundo hecho de átomos. Cada una de estas motitas de materia está recubierta de un patrón distintivo de electrones con carga negativa que actúan como guardianes del denso núcleo cargado positivamente. La química es la historia de cómo esos vigilantes comparten sus tareas entre muchos átomos, cambiando de formación pero siempre obedeciendo las estrictas reglas del mundo cuántico y manteniendo a los núcleos cautivos en unos patrones más amplios llamados

moléculas. En el aire que respiro mientras escribo esto hay parejas de átomos de oxígeno —cada pareja forma una molécula de oxígeno— moviéndose a 1.440 km/h y chocando con parejas de átomos de nitrógeno que viajan a 320 km/h, y que luego quizás rebotan contra una molécula de agua que va a más de 1.600 km/h. Es terriblemente caótico y complicado —distintos átomos, distintas moléculas, distintas velocidades— y, además, en cada centímetro cúbico de aire hay unas 30.000.000.000.000.000.000 (3×10^{19}) moléculas individuales, cada una de las cuales choca aproximadamente mil millones de veces por segundo. Uno podría pensar que lo más sensato sería dejar el asunto mientras todavía está a tiempo y ponerse a estudiar cirugía cerebral o teoría de la economía o cómo *hackear* superordenadores. O, en cualquier caso, algo más sencillo. Por suerte, quienes descubrieron el comportamiento de los gases no tenían ni la más remota idea de todo esto. Y es que la ignorancia puede ser muy útil. La idea de los átomos no llegó a formar parte de la ciencia hasta principios del siglo XIX, y la prueba irrefutable de su existencia no apareció hasta el año 1905, aproximadamente. En 1662, lo único que tenían Robert Boyle y su ayudante Robert Hooke eran unos objetos de cristal, algo de mercurio, un poco de aire atrapado y la cantidad justa de ignorancia. Descubrieron que, a medida que aumentaba la presión a la que se encontraba una bolsa de aire, su volumen menguaba. Esta es la ley de Boyle, y dice que la presión del gas es inversamente proporcional al volumen. Un siglo después, Jacques Charles descubrió que el volumen de un gas es directamente proporcional a su temperatura. Es decir, que si duplicas la temperatura, duplicas también su volumen. Resulta casi imposible de creer. ¿Cómo puede tanta complicación atómica acabar convirtiéndose en algo tan sencillo y tan coherente?

Una última bocanada de aire, un coletazo tranquilo con su gruesa cola, y el gigante deja atrás la superficie del mar. Lo único que este cachalote necesita para vivir durante los próximos cuarenta y cinco minutos se encuentra almacenado en su cuerpo, así que su cacería puede empezar. El premio es un calamar gigante, un monstruo gomo-

so armado de tentáculos, de feroces ventosas y de un pico aterrador. Para encontrar a su presa, el cachalote debe aventurarse en las profundidades de lo más oscuro del océano, en lugares a los que la luz del sol no ha llegado jamás. Sus inmersiones normales alcanzan de 500 a 1.000 metros de profundidad, y el récord registrado es de unos dos kilómetros. El cachalote sondea la oscuridad con un sonar altamente direccional, esperando oír el débil eco que le indique que la cena podría andar cerca. Y mientras tanto el calamar gigante sigue flotando, totalmente desprevenido y ajeno a lo que está ocurriendo, porque es sordo.

El tesoro más preciado que el cachalote se lleva en su viaje hacia la oscuridad es el oxígeno, ya que lo necesita para mantener las reacciones químicas que proporcionan energía a los músculos que usa para nadar, así como para su propia vida. Pero el oxígeno gaseoso que le proporciona la atmósfera es un lastre en las profundidades; de hecho, en el momento en que el cachalote deja la superficie, el aire que albergan sus pulmones se convierte en un problema. Cada metro que nada hacia abajo es un metro más de agua presionando sus pulmones para adentro. Las moléculas de nitrógeno y oxígeno rebotan entre ellas y con las paredes de los pulmones, y cada colisión provoca una opresión minúscula. En la superficie, la presión interior y la presión exterior mantienen al cachalote en equilibrio. Pero cuando el gigante se sumerge, se ve aplastado por el peso adicional del agua que lo cubre, y la opresión del exterior supera a la del interior. Esto provoca que las paredes de los pulmones se contraigan hasta encontrar el equilibrio, es decir, hasta que lleguen al punto en que las opresiones vuelvan a estar equilibradas. Y este equilibrio se alcanza porque, cuando el pulmón del cachalote se comprime, cada molécula tiene menos espacio y las colisiones entre ellas resultan más frecuentes; por lo tanto, hay más moléculas golpeando hacia fuera por todo el pulmón, lo que aumenta la presión en el interior, hasta que llega un momento en que las moléculas, que no paran de chocar entre sí, pueden competir en igualdad de condiciones con las del exterior. Diez metros de profundidad en el agua son suficientes para ejercer una presión añadida equivalente a toda una atmósfera adicional. De manera que incluso a esa profundi-

dad, cuando el cachalote todavía podría ver la superficie con facilidad si lo intentara, sus pulmones quedan reducidos a la mitad de su volumen inicial. Esto significa que hay el doble de colisiones moleculares contra las paredes, lo que iguala la presión duplicada que proviene del exterior. Pero puede que el calamar esté a un kilómetro de la superficie del océano, y, a esa profundidad, la enorme presión del agua podría provocar que el volumen de los pulmones del cachalote se desdoblara hasta el 1 % del volumen que tienen en la superficie.

Al final, el cachalote oye el reflejo de uno de sus ruidosos chasquidos. Con los pulmones encogidos y contando con el sonar como única guía, ahora debe prepararse para luchar en la inmensa oscuridad. El calamar gigante está armado y, aun cuando terminara sucumbiendo, es probable que el cachalote salga con horribles cicatrices. Sin oxígeno en los pulmones, ¿cómo puede siquiera tener energía para luchar?

El problema de tener los pulmones encogidos es que, si su volumen está reducido a una centésima parte del que tenía en la superficie, la presión del gas en el interior será cien veces mayor que la presión atmosférica. En los alveolos, la parte delicada de los pulmones donde se realiza el intercambio de oxígeno y dióxido de carbono en la sangre, esta presión podría impeler demasiado nitrógeno y demasiado oxígeno, los cuales se disolverían en el flujo sanguíneo del cachalote. El resultado sería un caso extremo de lo que los submarinistas llaman «síndrome de descompresión», y cuando el cachalote regresara a la superficie, el nitrógeno sobrante se convertiría en burbujas dentro de la sangre, lo que causaría todo tipo de daños. La solución evolutiva es cerrar los alveolos por completo desde el instante en que el cachalote abandona la superficie. No hay otra alternativa. Pero puede acceder a sus reservas de energía porque su sangre y sus músculos son capaces de almacenar una enorme cantidad de oxígeno. Los cachalotes tienen el doble de hemoglobina que los humanos, y unas diez veces más de mioglobina, que es la proteína que se usa para almacenar energía en los músculos. Mientras estaba en la superficie, el cachalote iba rellorando estas grandes reservas. Los cachalotes nunca respiran con los pulmones cuando se sumergen en las profundidades. Es demasiado

peligroso. Y tampoco apuran su última bocanada de aire mientras están sumergidos. Viven —y luchan— gracias al excedente acumulado en sus músculos, a las provisiones que han almacenado durante el tiempo que han pasado en la superficie.

Nadie ha presenciado nunca una batalla entre un cachalote y un calamar gigante. Pero los estómagos de los cachalotes muertos contienen montones de picos de calamar —la única parte de este cefalópodo que no pueden digerir—, así que cada cachalote lleva en su interior la cuenta de las batallas ganadas. Mientras el cachalote victorioso nada hacia la luz del sol, sus pulmones se van inflando de nuevo y recuperan la conexión con la reserva de sangre. A medida que la presión disminuye, el volumen vuelve a aumentar hasta que recupera su nivel inicial.

Curiosamente, la combinación de los comportamientos moleculares complejos con la estadística —la cual no suele considerarse simple— da lugar a unos resultados relativamente sencillos en la práctica. Desde luego, hay muchas moléculas y muchas colisiones y muchas velocidades distintas, pero los dos únicos factores que importan son el rango de velocidades a las que se mueven las diversas moléculas y la cantidad media de colisiones contra las paredes de su contenedor. La cantidad de colisiones y la fuerza de cada una de ellas —provocada por la velocidad y la masa de la molécula— determinan la presión. La opresión ejercida por todo ello, comparada con la opresión del exterior, es lo que determina el volumen. Y, entonces, la temperatura tiene un efecto ligeramente distinto.

—¿Quién estaría preocupado ahora mismo? —El profesor, Adam, lleva una túnica blanca que se estira sobre una panza satisfecha y redonda, justo la clase de apariencia que un director de *casting* buscaría para un panadero bonachón. Su marcado acento del este de Londres es un buen añadido. Hince el dedo en la mísera placa de masa que tiene frente a él, y se le queda pegada como si estuviera viva (porque, de hecho, lo está)—. Lo que un buen pan necesita —anuncia— es aire.

Estoy en una clase de cocina aprendiendo a hacer *focaccia*, un pan tradicional italiano. Diría que la última vez que me puse un delantal tenía diez años. Y aunque he hecho pan muchas veces, nunca había visto una masa que pareciera el respaldo de una silla, así que ya siento que estoy aprendiendo.

Siguiendo las instrucciones de Adam, empezamos a preparar la masa desde el principio. Cada uno de nosotros mezcla la levadura fresca con agua y luego vamos añadiendo harina y sal, y amasamos con vigor terapéutico para desarrollar el gluten, la proteína que da elasticidad al pan. Mientras estiramos y rompemos la estructura física, la levadura viva que dicha estructura contiene está fermentando azúcares y creando dióxido de carbono. Esta masa, como todas las que he hecho, no contiene nada de aire; lo único que alberga en su interior es un montón de burbujas de dióxido de carbono. Es como un biorreactor de color dorado, pegajoso y elástico, y los productos de vida que contiene están ahí atrapados, lo que hace que aumente de tamaño. Una vez concluida esta primera fase, damos a la masa un generoso baño de aceite de oliva y vemos como esta sigue subiendo mientras nos quitamos los restos de las manos y recogemos los que quedan en la mesa y en un perímetro sorprendentemente amplio a nuestro alrededor. Cada reacción de fermentación produce dos moléculas de dióxido de carbono, las cuales son repelidas por la levadura. El dióxido de carbono, o CO_2 —dos átomos de oxígeno pegados a un átomo de carbono—, es una pequeña molécula arreactiva, que a temperatura ambiente tiene energía suficiente para flotar libremente como un gas. Y cuando se encuentra en una burbuja con muchas más moléculas de CO_2 , se pasa horas actuando como si estuviera en los coches de choque. Cada vez que choca con otra molécula, es muy probable que ambas intercambien algo de energía, como en el billar, cuando la bola blanca choca con alguna de las otras bolas. A veces, una de ellas se detendrá casi por completo y la otra se quedará con toda esa energía y saldrá disparada a toda velocidad. Otras veces, compartirán esa energía. Cada vez que una molécula choca contra la pared de la burbuja, rica en gluten, ejerce presión al rebotar contra ella. Esta reacción es la que, llegados a este punto, hace que las burbujas crezcan, ya que al albergar más moléculas en su inte-

rior, la presión ejercida hacia fuera es cada vez más persistente. De esta forma, las burbujas se expanden hasta que la presión contraria ejercida por la atmósfera equilibra la presión hacia el exterior que ejercen las moléculas de dióxido de carbono. A veces, las moléculas de CO_2 se mueven muy rápido cuando chocan con la pared, y en otras ocasiones lo hacen muy lentamente. A los panaderos, como a los físicos, no les interesa saber cuáles son las moléculas que chocan contra ciertas paredes a unas velocidades concretas, porque todo eso es cuestión de estadística: a temperatura ambiente y en condiciones normales de presión atmosférica, el 29 % de ellas viajan a una velocidad de entre 350 y 500 metros por segundo, y saber cuál es cuál no es relevante.

Adam da una palmada para llamar nuestra atención y destapa la masa creciente con la gracia de un mago. Y entonces hace algo que es nuevo para mí. Estira la masa cubierta de aceite y la dobla sobre sí misma desde ambos extremos. El objetivo es atrapar aire entre los pliegues. Mi primera reacción silenciosa es pensar que está haciendo trampa, porque yo siempre había asumido que el único «aire» que había dentro del pan era el CO_2 de la levadura. Una vez, en Japón, vi a un maestro de origami enseñar a sus alumnos con mucho entusiasmo cómo aplicar celo en un caballo angular, y entonces sentí la misma rabia irracional que en esos instantes en la cocina. Pero, si lo que quieres es aire, ¿por qué no usar el mismo aire? Cuando esté preparado nuestro pan, nadie lo sabrá. Me rindo a la sabiduría del experto y, mansamente, doblo mi propia masa. Unas horas más tarde, cuando ya ha subido la masa un poco más y hemos hecho algunos dobleces más, y tras incorporar más aceite del que creía posible, mi naciente *focaccia* y sus burbujas estaban listas para entrar en el horno. Ese «aire» de dos clases distintas estaba a punto de tener su gran momento.

En el horno, la energía térmica fluía por el interior del pan. La presión allí dentro seguía siendo la misma que en el exterior, pero la temperatura del pan había aumentado súbitamente de 20 a 250 °C. En unidades absolutas, es un cambio de 293 a 523 kelvin, casi el doble de temperatura.¹ En un gas, eso significa que las moléculas se acele-

1. Abordaremos el significado de la temperatura absoluta en el capítulo 6.

ran. Lo que resulta contradictorio es que ninguna molécula tiene temperatura propia. Un gas —que es un conjunto de moléculas— puede tener temperatura, pero las moléculas que lo constituyen, no. La temperatura del gas no es más que una forma de expresar la energía cinética media de las moléculas, pero cada una de las moléculas está acelerándose y lentificándose constantemente, intercambiando su energía con las demás en cada colisión. Las moléculas individuales se limitan a montar en sus coches de choque particulares sirviéndose de la energía de la que disponen. Cuanto más rápido se mueven, más fuerte es el choque contra los lados de las burbujas y, por lo tanto, mayor es la presión que generan. Cuando metí el pan en el horno, las moléculas del gas ganaron inesperadamente muchísima energía térmica, y eso aumentó su velocidad. La velocidad media pasó entonces de 480 a 660 metros por segundo. De esta forma, la presión hacia el exterior ejercida en las paredes de las burbujas aumentó significativamente, y no había presión exterior que las detuviera. Cada burbuja creció en proporción a la temperatura, abriéndose paso por la masa hacia el exterior y forzándola a expandirse. Y aquí viene lo bueno: las burbujas de aire —constituídas, en su mayor parte, por nitrógeno y oxígeno— se expandieron de la misma forma que las burbujas de CO_2 . Esta es la última pieza del puzzle. Resulta que no importa de qué tipo sean las moléculas. Si duplicas la temperatura, el volumen se duplica (siempre que la presión se mantenga constante). Y de la misma forma, si mantienes el volumen constante y duplicas la temperatura, la presión se duplicará. El hecho de que haya átomos de distintos tipos en la mezcla es irrelevante, porque la estadística es la misma para cualquier mezcla. Nadie que vea el resultado final del pan podría diferenciar qué burbujas eran de CO_2 y cuáles de aire. Llegados a este punto, la base de proteína y carbohidrato que rodeaba las burbujas se coció y se solidificó. El tamaño de las burbujas se mantuvo fijo. Y así, nuestra blanca y esponjosa *focaccia* quedaba asegurada.

Existe una ley que describe el comportamiento de los gases, es la que conocemos como «ley de los gases ideales», y el idealismo de su nombre está plenamente justificado porque la ley funciona. De hecho, funciona extraordinariamente bien. Esta ley dice que, en una

masa gaseosa fija, la presión es inversamente proporcional al volumen —al duplicar la presión, el volumen se reduce a la mitad—, la temperatura es directamente proporcional a la presión —al duplicar la temperatura, la presión se duplica—, y el volumen es directamente proporcional a la temperatura si la presión se mantiene fija. No importa qué gas sea, lo único que importa es cuántas moléculas de ese gas hay. La ley de los gases ideales es lo que hace que funcionen los motores de combustión interna y los globos aerostáticos..., y que se hagan las palomitas. Y es relevante tanto para las cosas que se calientan como para las que se enfrían.

Llegar al Polo Sur fue una de las hazañas más importantes de la historia de la humanidad. Los grandes exploradores polares —Amundsen, Scott y Shackleton, entre otros— son figuras legendarias, y los libros sobre sus hazañas y fracasos cuentan algunas de las mejores historias de aventuras de todos los tiempos. Ellos se las tuvieron que ver con un frío inimaginable, con la falta de comida, con océanos indomables y con prendas de vestir que no estaban a la altura de su misión, pero además tenían a la poderosa ley de los gases ideales literalmente en su contra.

El centro de la Antártida es un altiplano elevado y seco. Está cubierto de una gruesa capa de hielo, pero casi nunca nieva. Su superficie blanca y brillante refleja prácticamente toda la débil luz que llega hacia el espacio, y las temperaturas pueden bajar de los ochenta grados bajo cero. Allí reina el silencio. A nivel atómico, la atmósfera es muy débil, ya que las moléculas del aire tienen poca energía —a causa del frío— y se mueven relativamente despacio. El aire de arriba desciende hacia el altiplano, y el hielo le roba todo el calor, así que el aire, ya frío, se enfría todavía más. La presión es fija, así que el aire encoge su volumen y se vuelve más denso. Las moléculas están más juntas y se mueven más lentamente, porque no son capaces de ejercer la presión suficiente hacia el exterior para competir con el aire que las rodea y que ejerce presión hacia el interior. A medida que la tierra se extiende desde el centro del continente hacia el océano, este aire frío y denso se

aleja también del centro deslizándose por la superficie, imparable, como una lenta cascada de agua. Los enormes valles lo canalizan como si fueran embudos, y va ganando velocidad a medida que estos embudos descienden hacia fuera, siempre hacia fuera, en dirección al océano. Son los vientos catabáticos del Ártico, y si uno pretende ir andando al Polo Sur, ha de prepararse para sentirlos en la cara durante todo el camino. Cuesta trabajo imaginar de qué otra forma podría la naturaleza haber jugado más sucio con los exploradores polares.

La palabra «catabático» no es más que el término que se usa para denominar a este tipo de viento, que podemos encontrar en muchos sitios, no todos fríos. Mientras descienden, esas débiles moléculas se calientan, aunque no sea más que un poco. Y las consecuencias de este calentamiento pueden ser impresionantes.

En 2007 vivía en San Diego y trabajaba en el Instituto Oceanográfico Scripps. Como norteña, desconfiaba un poco de la eterna luz solar, pero como me permitía nadar todas las mañanas en una piscina descubierta de cincuenta metros, no me podía quejar. Y las puestas de sol eran increíbles. San Diego está en la costa y, si miras hacia el oeste, puedes disfrutar de una vista impresionante del océano Pacífico, sin contar que la increíble belleza del horizonte al anochecer nunca defraudaba.

Echaba mucho de menos las estaciones, eso es cierto. Parecía que el tiempo no pasara jamás, era casi como vivir en un sueño. Pero entonces llegaban los vientos de Santa Ana y pasábamos de un tiempo soleado, cálido y alegre a un calor plomizo y seco. Los vientos de Santa Ana llegan en otoño, cuando el aire cruza los altos desiertos y fluye sobre la costa de California hacia el océano. Estos son también vientos catabáticos, exactamente como los del Ártico. Pero para cuando llegan al océano, el aire está mucho más caliente en la costa de lo que lo estaba en el altiplano. Recuerdo muy bien un día en que iba por la Interestatal 5 en dirección norte, hacia uno de los grandes valles que canalizaban el aire caliente hasta el mar. Un riachuelo de nubes bajas cubría el valle. Mi novio de entonces era quien conducía.

—¿Hueles a humo? —pregunté.

—No seas tonta —dijo él.

Pero a la mañana siguiente me desperté en un mundo extraño. Había incendios enormes al norte de San Diego extendiéndose a través de los valles, y el aire traía ceniza. Una hoguera se le había ido a alguien de las manos en esas condiciones tan cálidas y secas, y ahora los vientos alimentaban el fuego y este avanzaba imparable hacia la costa. El riachuelo de nubes que había visto antes era humo. La gente iba al trabajo, y al llegar, o bien los mandaban a casa, o bien se apiñaban para escuchar la radio, preguntándose si sus hogares estarían a salvo. Nosotros esperamos. El horizonte estaba nublado a causa de esas enormes nubes de ceniza que podían verse desde el espacio, pero los atardeceres de aquellas jornadas eran espectaculares. Tres días más tarde, el humo empezó a dispersarse. Las llamas habían arrasado los hogares de algunos de mis conocidos. Todo estaba cubierto por una capa de ceniza y las autoridades sanitarias aconsejaban evitar hacer ejercicio en el exterior durante al menos una semana.

Arriba, en el altiplano, el aire caliente del desierto se había enfriado y densificado, deslizándose seguidamente por las laderas, igual que los vientos que había tenido que afrontar Scott en el Ártico. Pero si aquellos incendios se desataron con tanta virulencia no fue solo porque el aire fuera seco, sino también porque estaba caliente. ¿Por qué se calentaba aún más al bajar de las alturas? ¿De dónde proviene esa energía? La ley de los gases ideales sigue actuando en este caso: se trataba de una masa fija de aire, y se movía a tal velocidad que no había tiempo para que se produjera ningún intercambio de energía con algo de lo que la rodeaba. Mientras esa corriente de aire denso bajaba, la atmósfera del fondo de la montaña ejercía presión sobre ella, porque la presión era mayor ahí abajo. Ejercer presión sobre algo es una forma de darle energía. Imagina, por ejemplo, cómo chocan las moléculas de aire contra la pared de un globo que se dirige hacia ellas. Rebotarán con más energía de la que tenían antes, porque chocan contra una superficie en movimiento. Así pues, el volumen del aire de los vientos de Santa Ana disminuyó porque la atmósfera que lo rodeaba estaba apretándolo hacia dentro. Esa compresión proporcionó más energía a las moléculas de aire que estaban en movimiento y, por lo tanto, la temperatura del viento aumentó. A esto se lo llama «calenta-

miento adiabático». Todos los años, en cuanto llegan los vientos de Santa Ana al estado de California, se extrema la precaución con las hogueras. Como ese aire tan caliente y seco lleva días robando la humedad del paisaje, es muy fácil que una chispa provoque un incendio. Y el calor no proviene únicamente del sol californiano; también procede de la energía extra que obtienen las moléculas del gas al ser comprimidas por el aire más denso que encuentran más cerca del océano. Cualquier cosa que varíe la velocidad de las moléculas del aire afectará a su temperatura.

Sucede lo mismo, pero en sentido contrario, cuando echas un chorro de nata montada de un bote. El aire que sale con la nata se ha expandido súbitamente y ha ejercido presión en todo cuanto tiene a su alrededor, lo cual hace que libere energía y se enfríe. Si la boquilla del bote de nata montada resulta fría al tacto es porque el gas que sale por ahí libera parte de su energía al entrar en contacto con la atmósfera libre, de manera que, en el lugar por donde sale, queda menos energía y, por lo tanto, el bote está frío.

La presión atmosférica es una medida para conocer la fuerza con que esas diminutas moléculas golpean una superficie. Normalmente no nos damos cuenta porque esos golpes son los mismos en todas las direcciones (si sostengo una hoja de papel, esta no se mueve porque se ve empujada con la misma fuerza desde los dos lados). A todos nos empuja el aire todo el rato, y, sin embargo, apenas lo notamos. Llevé mucho tiempo entender el verdadero alcance de ese empuje, y cuando por fin se comprendió, la respuesta dejó a todos algo sorprendidos. La magnitud del descubrimiento era fácil de apreciar porque su demostración fue inusualmente memorable. No es muy frecuente que un importante experimento científico dé además pie a un espectáculo teatral, pero en este caso se daban todos los ingredientes necesarios: caballos, suspense, un resultado impresionante y el emperador del Sacro Imperio Romano como espectador.

La dificultad residía en que, para calcular la fuerza con que el aire empuja algo, es preciso extraer todo el aire que hay al otro lado del objeto, creando un vacío. En el siglo IV a. C., Aristóteles había afirmado que «la naturaleza aborrece el vacío», y esta seguía siendo la idea

predominante casi mil años después. Crear vacío parecía, pues, algo descartado. Pero tiempo después, aproximadamente hacia 1650, Otto von Guericke inventó la primera bomba de vacío. En lugar de escribir un artículo técnico sobre el asunto y dejarlo caer en el olvido, decidió crear un espectáculo para demostrar su teoría.² Seguramente, el hecho de ser un político y diplomático reconocido le fue de gran ayuda, así como las buenas relaciones que mantenía con los dirigentes de su época.

El 8 de mayo de 1654, Fernando III, emperador del Sacro Imperio Romano y señor de una gran parte de Europa, se juntó con sus cortesanos fuera del Reichstag, en Bavaria. Otto presentó una esfera hueca de cincuenta centímetros de diámetro y hecha de cobre grueso. Estaba separada en dos mitades cuyos bordes se tocaban. Cada mitad tenía una argolla en la parte exterior, para que se pudieran atar sendas cuerdas y usarlas para tirar de cada una de las mitades. Otto engrasó la superficie de los bordes, unió las dos partes y utilizó su flamante bomba de vacío para extraer el aire del interior de la esfera. No había nada que las mantuviera unidas, pero cuando se hubo extraído todo el aire, parecía que las dos mitades estuvieran pegadas con cola. Otto se había dado cuenta de que la bomba de vacío le permitía comprobar cuánta presión podía llegar a ejercer la atmósfera. Había miles de millones de minúsculas moléculas de aire golpeando sin cesar el exterior de la esfera, y esto era lo que mantenía las dos mitades unidas. Pero dentro no había nada que contrarrestara esa presión.³ Solo se podían separar los dos hemisferios si se tiraba de ellos con más fuerza de la que ejercía la presión del aire.

Entonces trajeron los caballos. Se ató unos cuantos en cada lado de la esfera para que tiraran en direcciones opuestas, como en una gran demostración del juego de la soga. Bajo la mirada del emperador y su séquito, los caballos tiraban contra el aire invisible. Lo único que mantenía la esfera unida era la fuerza de las moléculas de aire que chocaban contra algo del tamaño de un balón de playa. Pero la fuerza de

2. En la actualidad, esta sustitución no es la forma recomendada de hacer ciencia.

3. No sabemos cuánto aire logró extraer Otto con su bomba de vacío. Desde luego, no pudo haberlo sacado todo, pero debió de ser una parte significativa.

treinta caballos no fue suficiente para separar la esfera. Cuando se detuvo el tira y afloja, Otto abrió la válvula para dejar que el aire penetra en el interior de la esfera, y entonces las dos mitades se separaron por sí solas. No había duda alguna sobre el vencedor. La presión del aire era mucho más fuerte de lo que nadie habría imaginado. Si se extrae todo el aire de una esfera de ese tamaño y se la cuelga en vertical, la presión hacia arriba del aire podría, en teoría, soportar hasta dos mil kilos, lo que equivale al peso de un rinoceronte adulto. Esto significa que si dibujas un círculo de cincuenta centímetros de diámetro en el suelo, la fuerza del empuje del aire en ese trozo de suelo también equivale al peso de un rinoceronte de dos mil kilos. Esas diminutas moléculas invisibles nos golpean con muchísima fuerza. Otto llevó a cabo su demostración en muchas ocasiones frente a públicos de carácter distinto, y su experimento llegó a conocerse con el nombre de «los hemisferios de Magdeburgo», por la población natal de su descubridor.

Los experimentos de Otto se hicieron famosos en parte porque otras personas escribieron sobre ellos. La primera vez que sus ideas se introdujeron en la corriente prevaeciente de la ciencia fue gracias a un libro escrito por Gaspar Schott y publicado en 1657. Precisamente leyendo sobre la bomba de vacío de Otto fue como se inspiraron Robert Boyle y Robert Hooke para llevar a cabo sus experimentos sobre la presión del gas.

Tú mismo puedes llevar a cabo una versión casera de este experimento, sin necesidad de caballos o emperadores. Coge un cuadrado de cartón plano y grueso que tenga el tamaño adecuado para cubrir un vaso. Conviene hacer esta prueba sobre el fregadero, para evitar percances. A continuación llena el vaso de agua hasta el borde y coloca encima el cartón. Empújalo contra el borde del vaso, de manera que no quede nada de aire entre la superficie del agua y el cartón. Entonces, gira el vaso y retira la mano. El cartón, que estará soportando todo el peso del agua, se quedará donde está. Si lo hace es porque hay moléculas de aire que lo golpean desde abajo, empujándolo hacia arriba. Ese empuje es suficiente para mantener arriba el agua.

El martilleo de las moléculas de aire no solo sirve para mantener las cosas en un sitio. También puede usarse para mover objetos, y los

humanos no fueron los primeros en aprovecharse de ello. Vamos a conocer ahora a un elefante, uno de los mayores expertos del planeta en manipular su entorno sirviéndose del aire.

El elefante africano es un gigante majestuoso al que normalmente encontramos paseando tranquilamente por la seca y polvorienta sabana. La vida familiar del elefante se construye alrededor de las hembras. Una elefanta de edad avanzada —la matriarca— lidera el grupo mientras deambulan para encontrar comida y agua, confiando en sus recuerdos del paisaje para tomar decisiones. Pero la supervivencia de estos animales no depende únicamente de su peso. Puede que los elefantes tengan un cuerpo torpe y pesado, pero para compensar, disponen de una de las herramientas más delicadas y sensibles del reino animal: la trompa. Cuando una familia se desplaza, no dejan nunca de explorar el mundo con esta extremidad tan peculiar, con la cual señalizan, olfatean, comen y resoplan.

La trompa de los elefantes es fascinante en muchos sentidos. Es una red de músculos entrelazados, capaces de doblarse y alzarse y de recoger objetos con una destreza asombrosa. Y si eso fuera todo, ya sería lo suficientemente útil, pero las dos fosas nasales que recorren toda la longitud de la trompa la hacen todavía mejor. Estas fosas son como tuberías flexibles que unen la punta husmeadora de la trompa con los pulmones del elefante. Y es aquí donde empieza la diversión.

Cuando nuestra elefanta y su familia se acercan a una laguna, el aire «quieto» que las rodea sigue chocando y empujando como en cualquier otra parte, golpeando su arrugada piel gris, el suelo y la superficie del agua. La matriarca camina algo avanzada con respecto al grupo, balanceando la trompa mientras se mete sin prisa en el lago, haciendo que su reflejo se ondule en el agua. Introduce la trompa en el lago, cierra la boca y los enormes músculos de su pecho se levantan y expanden su caja torácica. Al expandirse sus pulmones, las moléculas de aire que contienen se dispersan para ocupar un nuevo espacio. Pero eso significa que, justo al final de la punta de la trompa, donde el agua fría entra en contacto con el aire de sus fosas nasales, hay menos moléculas de aire golpeando el agua. Y las que quedan se mueven igual de rápido, pero no se producen tantas colisiones. La conse-

cuencia es que la presión en el interior de sus pulmones se ha reducido. Ahora la atmósfera está ganando la competición de empujones entre las moléculas de aire que golpean el agua del lago y las moléculas de aire del interior de la matriarca. La presión del interior ya no puede igualar a la del exterior, y el agua es solo algo con lo que hay que lidiar en dicha competición. Así pues, la atmósfera empuja el agua hacia arriba por el interior de la trompa del elefante, porque lo que hay dentro no puede contrarrestar la presión. Una vez que el agua ha ocupado una parte del espacio adicional, las moléculas del aire del interior vuelven a estar tan juntas como antes, y el agua ya no va a ningún sitio.

Los elefantes no pueden beber con la trompa; si lo intentaran, toserían igual que lo harías tú si intentaras beber por la nariz. Así que cuando la matriarca tiene en la trompa unos ocho litros de agua, deja de expandir su caja torácica. Riza la trompa hacia abajo y la apunta a la boca. Entonces usa los músculos del pecho para comprimir el pecho, reduciendo así el tamaño de los pulmones. Al hacer que las moléculas de aire del interior se aprieten unas contra otras, la superficie del agua que queda hacia la mitad de la trompa resulta golpeada con mucha más frecuencia. En su lucha, el aire del interior y el aire del exterior intercambian los papeles, y el agua se ve propulsada por la trompa hacia la boca de la elefanta. Nuestra matriarca está controlando el volumen de sus pulmones para tener bajo control la fuerza con que sale el aire desde su interior. Si cierra la boca, el único lugar en el que puede haber movimiento es en la trompa, y cualquier cosa que se encuentre en la punta de esta será empujada hacia dentro o hacia fuera. La trompa y los pulmones de los elefantes forman una herramienta combinada que permite manipular el aire de forma que sea el propio aire, y no el elefante, el que se encargue de empujar.

Nosotros hacemos lo mismo cuando sorbemos algo a través de una pajita.⁴ Al expandir nuestros pulmones, el aire del interior se distribuye con menos densidad. En el interior de la pajita hay menos

4. Y al respirar. Cada vez que respiramos, el aire entra en los pulmones porque la atmósfera lo empuja en esa dirección.

moléculas de aire que puedan ejercer presión sobre la superficie del agua, y la presión que la atmósfera ejerce sobre el resto del líquido hace que este suba por la pajita. A esto lo llamamos sorber, pero en realidad no somos nosotros quienes estamos «tirando» de la bebida. Es la propia atmósfera la que empuja el líquido hacia arriba por la pajita, encargándose de todo el trabajo por nosotros. Incluso algo tan pesado como el agua puede ser redirigido si el martilleo de las moléculas de aire es más fuerte en un lado que en el otro.

Sin embargo, sorber aire a través de una trompa o de una pajita tiene sus limitaciones. Cuanto mayor sea la diferencia de presión entre los dos extremos, más fuerte será ese empuje. Ahora bien, la mayor diferencia que se puede dar cuando sorbemos algo es la diferencia que existe entre la presión atmosférica y cero. Aunque tuviéramos una bomba de vacío perfecta en lugar de pulmones, no podríamos beber en vertical por una pajita de más de 10,2 metros de longitud, porque esa es la altura máxima a la que nuestra atmósfera puede empujar el agua. Así que para explotar todo el potencial de las moléculas de gas para empujar cosas, tenemos que conseguir que actúen en presiones más altas. El empuje de la atmósfera puede ser fuerte, pero si haces que otro gas esté más caliente y lo sometes a una fuerte presión, el empuje será mayor. Si reúnes las suficientes moléculas de gas y haces que choquen contra algo con la frecuencia y la velocidad suficientes, podrás mover una civilización entera.

Una locomotora de vapor es un dragón hecho de hierro, una bestia poderosa que silba y respira. Hace menos de un siglo, estos dragones estaban por todas partes, llevando los productos de la industria y las necesidades de la sociedad por medio de continentes enteros y abriendo los horizontes de sus pasajeros. Eran algo común y corriente, ruidoso y contaminante, pero también eran hermosas obras de ingeniería. Cuando se volvieron obsoletos, no se dejó morir a aquellos dragones, ya que la sociedad no quería desprenderse de ellos. Se han mantenido vivos gracias a los voluntarios, a los aficionados y a una gran dosis de cariño. Yo crecí en el norte de Inglaterra, así que mi niñez estuvo impregnada de la historia de la revolución industrial, de sus molinos, canales, fábricas y, sobre todo, de vapor. Pero ahora vivo

en Londres, de modo que todo aquello parece fácil de olvidar. Un viaje en el tren de vapor de Bluebell en compañía de mi hermana me lo trajo de nuevo a la memoria.

Era un frío día de invierno, perfecto para un viaje propulsado por vapor, con la promesa de té y bollos al llegar a nuestro destino. No estuvimos mucho rato en la estación de la que partimos, pero cuando llegamos a Sheffield Park y nos apeamos del tren, nos envolvió un tráfago constante, lento pero sin pausa. Un enjambre siempre distinto de humanos que parecían diminutos al lado de las bestias de hierro se ocupaba continuamente de las máquinas. Era fácil identificar a los humanos que trabajaban con la maquinaria: petos azules, gorras con visera, actitud alegre, barba —opcional— y normalmente apoyados en alguna parte en los ratos que les quedaban libres entre una máquina y otra. Como mi hermana observó, muchos de ellos parecían llamarse Dave. La belleza de una máquina de vapor reside en que el principio que la mueve es maravillosamente sencillo, pero la fuerza bruta que produce debe ser estimulada, amansada y cuidada. Por eso, una máquina de vapor y los operarios que la manejan forman un equipo.

Ahí de pie, con la mirada puesta en una enorme máquina de color negro, era difícil comprender que, en el fondo, aquello no era más que un horno con ruedas que se calentaba por medio de un hervidor gigante. Uno de los Daves nos invitó a subir a la cabina. Subimos por la escalera que queda justo detrás del motor y, de pronto, nos hallamos en una gruta llena de palancas de metal, esferas y tubos. Había también dos tazas esmaltadas de color blanco y un bocadillo guardado detrás de uno de los tubos. Pero lo mejor de la cabina era que nos permitía ver las entrañas de la bestia. El horno gigante del interior de una máquina de vapor está lleno de carbón que, cuando arde, se pone de color amarillo intenso. El fogonero me dio una pala y me dijo que la alimentara yo misma y, obedeciendo, cargué enseguida la pala con carbón del ténder que tenía a mis espaldas y lo eché a la brillante boca. La máquina estaba hambrienta. En un trayecto de 18 kilómetros, consume 500 kilos de carbón. Esa media tonelada de oro negro sólido se convierte en gas, es decir, en dióxido de carbono y agua.

Y como la combustión libera enormes cantidades de energía, esos gases están extremadamente calientes. Este es el principio de la conversión energética que hace que el tren se mueva.

Si te fijas en una máquina de vapor, verás que su característica principal es el largo cilindro de la propia «máquina», que va desde la cabina hasta la chimenea. Nunca me había parado a pensar qué había en su interior, pero resulta que está llena de tubos. Estos tubos transportan el gas caliente desde la caja de combustión a través de la máquina, y esto es la caldera. La mayor parte del espacio entre los tubos está ocupado por agua, lo que hace que sea como una bañera gigante llena de líquido hirviendo y burbujeante. Al calentarse con los tubos se produce el vapor, es decir, moléculas calientes de aire que zumban a gran velocidad en el espacio superior del motor. Esta es la esencia de la máquina de vapor: un horno y una caldera que producen grandes nubes de vapor de agua caliente. Este dragón no suelta bocanadas de fuego, sino que se alimenta de miles de millones de moléculas energéticas que se mueven a grandes velocidades pero que están atrapadas en la máquina. La temperatura de ese gas está en torno a los 180 °C y la presión en la parte superior de la caldera es diez veces mayor que la presión atmosférica. Las moléculas golpean con mucha fuerza las paredes de la máquina, pero solo pueden escapar una vez que han cumplido con su cometido.

Bajamos de la cabina y nos dirigimos hacia la parte delantera. El imponente motor, la media tonelada de carbón, la caldera gigante y el equipo humano, todos ellos estaban al servicio de lo que acabamos de ver: dos cilindros con pistones en su interior, cada uno de los cuales tenía unos cincuenta centímetros de diámetro y setenta de largo. Es aquí abajo, en la parte delantera, en un espacio empuqueñecido por el dragón de arriba, donde se lleva a cabo el trabajo de verdad. El vapor caliente y sometido a una elevada presión entra por cada uno de los tubos. La presión atmosférica en el otro extremo del pistón no puede igualar las diez atmósferas que el dragón acaba de exhalar. Las inquietas moléculas empujan el pistón a lo largo del cilindro y son finalmente liberadas a la atmósfera con un chu-chu de satisfacción. Esto es lo que oímos cuando el conocido resoplido de la locomotora de vapor

se nos acerca haciendo chu, chu. Es el vapor de agua que está siendo liberado a la atmósfera después de haber cumplido su misión. El pistón mueve las ruedas, y estas se agarran a los raíles y desplazan los vagones. Sabemos que las máquinas de vapor necesitan grandes cantidades de carbón para funcionar, pero casi nadie habla de cuánta agua se consume en cada viaje. Los 500 kilos de carbón con los que se alimenta la máquina en cada recorrido se usan para convertir 4.500 litros de agua en gas; este gas empuja un pistón y luego se pierde en la atmósfera con cada chu-chu.⁵

Ya era hora de dejar la máquina y regresar a uno de los vagones del tren para volver a casa. El trayecto de vuelta nos pareció diferente. Las nubes de vapor que silbaban al otro lado de la ventana habían aportado algo nuevo a nuestra excursión. En lugar de parecer ruidosa e intrusiva, ahora la máquina que nos transportaba parecía relativamente silenciosa y tranquila, teniendo en cuenta lo que estaba ocurriendo en su interior. Sería maravilloso que alguien construyera una locomotora de vapor solo con cristal, así podríamos ver a la bestia trabajar.

La revolución del vapor de principios del siglo XIX trató de utilizar la presión de las moléculas de gas para algo útil. Para eso basta con disponer de una superficie llena de moléculas de gas que golpeen con más fuerza un extremo que el otro. Esa presión puede levantar la tapa de una sartén mientras cocinas, o se puede emplear para transportar alimentos, combustible y personas; pero en cualquiera de los casos, parte de los mismos principios básicos. Hoy en día, ya no usamos motores de vapor, pero seguimos utilizando esa presión. Técnicamente, un motor de vapor es un «motor de combustión externa», porque el horno está separado de la caldera. En el motor de un coche, la combustión tiene lugar en el cilindro: la gasolina se quema justo al lado del pistón, y la propia combustión produce el gas caliente que mueve

5. Si alguna vez te has preguntado cómo funciona la locomotora de los dibujos animados *Thomas y sus amigos*, la respuesta es que funciona gracias al agua. El agua puede almacenarse en un vagón aparte junto con el carbón (es lo que se llama «tender») o se puede guardar en un depósito cerca del motor. Thomas almacena el agua alrededor del motor (de ahí que sea rectangular), y eso lo convierte en una locomotora-tender.

el pistón. A eso se lo llama «motor de combustión interna». Cada vez que subes a un coche o a un autobús, estás siendo transportado por el empuje de las moléculas de gas.

Es fácil jugar con los efectos de la presión y el volumen, especialmente si tienes una botella de cuello ancho y un huevo duro pelado. La boca de la botella debe ser algo más estrecha que el huevo para que puedas colocarlo sobre ella sin que se caiga dentro. Prende una hoja de papel, métela en la botella, deja que arda unos segundos y luego vuelve a poner el huevo encima de la boca. Espera un rato y verás cómo el huevo se escurre hacia el interior de la botella. Es un poco raro, y de hecho, tener un huevo dentro de una botella de la que no puedes sacarlo es algo inútil. Existen varias soluciones, pero una de ellas es poner la botella boca abajo, de manera que el huevo quede sobre la boca, y ponerla luego bajo el grifo de agua caliente. Al cabo de un rato, el huevo saldrá disparado.

La cuestión es que tenemos una masa fija de gas —en el interior de la botella— y una forma de saber si la presión del interior es mayor o menor que la presión de la atmósfera. Si el huevo bloquea la boca de la botella, el volumen del gas del interior es fijo. Si aumentamos la temperatura del interior quemando algo, la presión del interior aumentará también y el aire se escapará entre los laterales del huevo (si es que lo tenemos encima de la botella). Cuando se vuelva a enfriar, la presión del interior disminuirá —ya que el volumen es fijo— y el huevo será empujado hacia el interior, porque la presión del exterior ahora es mayor que la que empuja hacia fuera desde el interior de la botella. Puedes hacer que el huevo se mueva con solo calentar o enfriar el aire de un contenedor cuyo volumen sea fijo.

Las altas presiones presentes en un motor de vapor son controladas y estables, perfectas para empujar pistones y hacer girar las ruedas. Pero eso no es todo. ¿Por qué malgastar energía en las fases intermedias entre el gas y las ruedas? ¿Por qué no dejar que los gases calientes de presión alta muevan directamente el vehículo hacia delante? Así es como han funcionado siempre las pistolas, los cañones y los fuegos artificiales, aunque, como todos sabemos, las primeras eran muy poco fiables. Pero a principios del siglo xx, la tecnología y la am-

bición habían avanzado. Y entonces apareció el cohete, la forma más extrema de propulsión directa jamás inventada.

No fue hasta después de la primera guerra mundial cuando la tecnología necesaria alcanzó cierto grado de fiabilidad, pero en la década de 1930 se podía lanzar un cohete que probablemente iría en la dirección correcta, y que posiblemente no acabaría con la vida de nadie. En la mayoría de los casos. Como ocurre con tantas otras tecnologías nuevas, los inventores consiguieron que funcionaran antes de que nadie supiera qué hacer con ellas. Y del pozo sin fondo de la emocionante creatividad humana surgió algo completamente nuevo y con apariencia moderna que, en realidad, estaba irremediablemente condenado al fracaso: el correo por cohete.

En Europa, el correo por cohete apareció gracias a un solo hombre: Gerhard Zucker. Algunos inventores de la época andaban trasteando con los cohetes, pero Zucker lideró ese campo gracias a su enorme perseverancia y a un optimismo a prueba de cualquier impedimento. Este joven alemán estaba obsesionado con los cohetes, y como el ejército no estaba interesado en su trabajo, buscó en el ámbito civil una excusa para continuar con sus investigaciones. Creía que mandar correo por cohete era algo que el mundo estaba pidiendo a gritos, ya que sería un medio rápido, capaz de cruzar el océano y, además, totalmente novedoso. Los alemanes toleraron sus primeros —e infructuosos— experimentos, hasta que decidieron dejar de hacerlo, y fue entonces cuando Zucker se marchó al Reino Unido. Allí encontró amigos y apoyo entre los miembros de la comunidad filatélica, que estaban encantados con la idea de que apareciera un nuevo tipo de sello para aquella nueva distribución del correo postal. Todo iba bien. Tras una prueba a pequeña escala en Hampshire, Zucker fue enviado a Escocia en julio de 1934 para intentar mandar correo por cohete entre las islas de Scarp y Harris.

El cohete de Zucker no era especialmente sofisticado. La parte principal era un cilindro metálico de un metro de longitud. En su interior llevaba un estrecho tubo de cobre con una boquilla cubierta de explosivo pulverizado en el extremo posterior. El espacio entre el tubo y el cilindro del exterior estaba lleno de cartas, y en la parte de-

lantera había una especie de pico puntiagudo con un muelle, se supone que para suavizar el aterrizaje. Un detalle adorable es que Zucker, en su esquema para el montaje, había anotado junto a la fina capa que separaba el explosivo y las cartas, altamente inflamables, la frase siguiente: «Asbestos embalados alrededor del cartucho para evitar que se dañe el correo». Se colocó el cohete de costado en un caballete inclinado que apuntaba hacia arriba y hacia un lado. En el momento del lanzamiento, una descarga debía prender el explosivo, y la combustión resultante produciría grandes cantidades de gas caliente de alta presión. Las moléculas de gas, que se moverían a gran velocidad, rebotarían en el interior, chocando contra la parte delantera del cohete, lo cual lo movería hacia delante; y como no había un empuje equivalente en la parte trasera, el gas se escaparía por la boquilla hacia la atmósfera. Este desequilibrio en los empujes podría hacer que el cohete se moviera hacia delante a mucha velocidad. La combustión del explosivo duraría todavía unos segundos más, los suficientes para empujar el cohete hacia lo alto y sobrevolar el canal entre las dos islas. A nadie parecía importarle demasiado saber cómo y dónde aterrizaría, pero precisamente por eso se decidió probarlo en una parte muy remota de Escocia rodeada por el mar.

Zucker reunió 1.200 cartas para enviarlas como parte de la prueba, cada una de ellas adornada con un sello especial en el que podía leerse «Western Isles Rocket Post». Introdujo tantas como cupieron en el cohete y montó el caballete bajo la atenta mirada de una multitud perpleja y una primitiva cámara de televisión de la cadena BBC. Había llegado el momento.

Cuando presionó el botón del lanzamiento, la descarga encendió el explosivo. La rápida combustión generó la esperada mezcla de gases calientes en el interior del tubo de cobre, y las energéticas moléculas golpearon la parte delantera del cohete, propulsándolo desde el caballete a gran velocidad. Pero al cabo de unos segundos, se oyó un fuerte ruido sordo y el cohete desapareció tras una columna de humo. A medida que el humo desaparecía, vieron como cientos de cartas caían desde el cielo. Los asbestos habían cumplido su parte, pero el cohete no. El gas caliente y a alta presión es difícil de controlar, y las

moléculas energéticas habían roto el revestimiento. Zucker atribuyó el error al cartucho de explosivo y rápidamente se puso a recoger las cartas y a preparar una segunda prueba.

Unos días más tarde, se introdujeron en otro cohete las 793 cartas que habían sobrevivido al primer lanzamiento junto con 142 misivas nuevas. En esta ocasión fue lanzado desde la isla de Harris, en dirección a la de Scarp. Pero la suerte no acompañó a Zucker. El segundo cohete también explotó en la plataforma de lanzamiento, y esta vez la explosión fue todavía más sonora. Las cartas que sobrevivieron fueron recogidas de nuevo y enviadas a sus destinatarios mediante el sistema de correo convencional, con los bordes chamuscados como recuerdo. Ya no se hicieron más pruebas. Durante los años posteriores, el tenaz Zucker siguió trabajando en sus lanzamientos, siempre convencido de que la próxima vez sería la buena. Y, sin embargo, nunca lo fue,⁶ al menos no para distribuir el correo. Zucker trabajó duramente contra lo desconocido, pero solo la ventaja de la perspectiva nos permite comprender que no era el momento adecuado ni el lugar adecuado ni la idea adecuada. Si todo lo anterior hubiera estado de su lado, ahora alabaríamos su genialidad. Lo que sucede es que su trabajo de ingeniería espacial a pequeña escala era, sencillamente, demasiado poco fiable y demasiado complejo para enviar mensajes de forma más efectiva y rápida que el transporte motorizado y el telégrafo. Ahora bien, había algo en lo que sí llevaba razón: que usar gases calientes de alta presión como propulsores es una estrategia que tiene un gran potencial para el transporte de cosas. Pero no fue él quien sacó partido de este principio, sino otros los que encontraron una aplicación apropiada y resolvieron los problemas prácticos hasta que lograron que funcionara con éxito. El desarrollo de cohetes se convirtió en el dominio de los ejércitos, con los cohetes alemanes V1 y V2 usados en la segunda guerra mundial como precursores y con los programas espaciales civiles liderando el campo más tarde.

6. La Indian Airmail Society también experimentó con el correo por cohete durante la misma época. Se llevaron a cabo 270 vuelos, en los que se enviaron tanto paquetes como cartas, pero este nuevo sistema de envío nunca llegó a ser un éxito duradero. Estaba claro que, en cuanto a fiabilidad y costes, el correo por cohete nunca iba a poder competir con los sistemas regulares de distribución de correo por vía terrestre.

Hoy en día, todos estamos familiarizados con las imágenes de enormes cohetes que transportan cargamentos de personas y equipamiento a la Estación Espacial Internacional, o que ponen satélites en órbita. La potencia de los cohetes puede resultar intimidante, y los modernos sistemas de control que hacen que ahora sean seguros y fiables son una hazaña humana impresionante. Pero el mecanismo básico que ha permitido volar a cada cohete Saturno V, a cada Soyuz y Ariane y Falcon 9, es el mismo que impulsó al primitivo cohete de Gerhard Zucker. Si creas suficiente gas caliente de alta presión a la velocidad necesaria, podrás usar la enorme energía acumulada proveniente de miles de millones de moléculas que chocan contra cosas. La presión de vuelo en la primera fase de un cohete Soyuz es unas sesenta veces mayor que la presión atmosférica, lo que hace que el empuje sea sesenta veces mayor que la presión normal del aire. Pero es exactamente el mismo tipo de empuje: se trata solamente de moléculas chocando contra cosas. Si hay una enorme cantidad de ellas colisionando a la frecuencia y la velocidad adecuadas pueden mandar un hombre a la Luna. Por eso, no debemos subestimar las cosas que son demasiado pequeñas para poder percibir las a simple vista.

Estamos continuamente rodeados de moléculas gaseosas. La atmósfera de la Tierra nos rodea, choca contra nosotros, nos empuja y también nos mantiene vivos. Lo maravilloso de nuestra atmósfera es que no es estática, sino que se mantiene en movimiento constante y nunca para de cambiar. El aire es invisible a nuestros ojos, pero si pudiéramos percibirlo, veríamos enormes masas de aire que se calientan y enfrían, se expanden y contraen, siempre en movimiento. Lo que hace nuestra atmósfera se rige por las leyes de los gases que hemos visto en acción en este capítulo, igual que ocurre con cualquier otro grupo de moléculas de gas. Aunque no esté atrapada en el interior de los pulmones de un cachalote o en un motor de vapor, la atmósfera siempre está empujando. Pero como se encuentra rodeada de aire, lo que hace es empujarse constantemente a sí misma por el mundo, adaptándose a las condiciones imperantes. No podemos ver los detalles, pero hemos puesto nombre a sus consecuencias: el tiempo atmosférico.