

Las Dinámicas Tecnológicas del Crecimiento y la Estabilidad

Erald Kolasi

¿Cómo produce el cambio tecnológico el crecimiento económico? ¿Y cómo afecta este crecimiento a la ecosfera más amplia en la que se inscribe? Estas son las preguntas centrales a las que nos referimos ahora. Recordemos que, en la síntesis ecodinámica, el crecimiento significa la expansión y diversificación de formas de energía útil, donde la energía útil puede ser cualquier cosa, desde el trabajo mecánico hasta la electricidad. La TFA (tasa de flujo agregada) es la medida total de la energía convertida por una economía concreta en un año determinado, por lo que el crecimiento solo significa un aumento de la TFA. Podemos pensar en la tecnología como el conjunto de todos los sistemas biofísicos, métodos productivos y capacidades intelectuales que permiten a los seres humanos convertir la energía de una forma preexistente a otra. La naturaleza no nos da la cerámica, las mesas y los coches. Estas cosas tienen que construirse y fabricarse a partir de materias primas, y ese proceso implica todo, desde la mano de obra hasta las máquinas y los vehículos. Por ejemplo, las centrales eléctricas de carbón queman carbón para producir electricidad, por lo que diríamos que han convertido el carbón en electricidad. En otro caso, las fibras naturales de algodón primero deben cardarse e hilarse para que puedan enderezarse y reforzarse, y luego los hilos resultantes se tejen para convertirlos en prendas de vestir acabadas.



Foto de [Wolfgang Weiser](#) en [Unsplash](#)

El objetivo principal de este capítulo es analizar la intersección entre la dinámica ecológica y el cambio tecnológico. Sería un error considerar el cambio tecnológico como un fenómeno exclusivamente social, lo que en este contexto significa un proceso que tiene lugar dentro de la sociedad humana. Las sociedades interactúan con el mundo natural de formas muy complejas, y esas interacciones también afectan al ritmo y la dirección del desarrollo tecnológico. La idea principal es que el cambio tecnológico no tiene un objetivo inherente; la tecnología es una característica intrínseca y emergente del nexo entre el mundo social y el mundo ecológico. Los cambios tecnológicos están determinados y limitados por los conflictos políticos, las luchas de clases y los principios ecológicos que inducen diferentes

adaptaciones modales. La tecnología tampoco es simplemente un conjunto fijo de productos en un momento dado; como parte del proceso de conversión, también es un método de ingeniería adaptativa ante problemas y retos complejos. No obstante, el cambio tecnológico es un proceso integrado en la sociedad, de aquí que afecta y depende de las relaciones sociales, políticas y culturales, como el comercio y el dinero. Para sostener las etapas de conversión multidimensionales y con un alto consumo energético de sus coronas más amplias, las personas suelen establecer nuevas instituciones y estructuras organizativas. Las relaciones laborales cambian y se erigen nuevas jerarquías sociales. Si un nuevo proceso de conversión requiere un trabajo más intensivo en mano de obra, también se necesitarán nuevas formas de gestión y administración para controlar y dirigir la mano de obra disponible. Ese proceso puede conducir a la verticalización de la jerarquía, con nuevas capas de gestión necesarias para controlar el proceso de conversión. Los cambios en el proceso de conversión requieren cambios en la especialización y la división del trabajo. Si un nuevo proceso de conversión requiere mayores flujos de energía y se extiende más en el tiempo y el espacio en relación con un proceso anterior, puede dar lugar a nuevos patrones modales, jerarquías sociales y estructuras organizativas. Esto se debe a que un proceso de conversión complejo y prolongado que requiere múltiples etapas de transformación necesita diferentes personas que puedan dominar o supervisar las diferentes etapas.

El concepto de «innovación tecnológica» es omnipresente en la sociedad moderna, pero también es más controvertido y abierto a interpretación de lo que normalmente se podría pensar, y no existe un acuerdo universal sobre su definición empírica. Algunos académicos han intentado medir la innovación a nivel nacional analizando el número de patentes producidas por un país en particular, partiendo de la idea de que un mayor número de patentes aprobadas indica la invención de métodos y tecnologías más valiosos. Pero esta métrica tiene sin duda importantes defectos, especialmente en el caso de Estados Unidos. Un estudio estimó que casi el 30 % de todas las patentes estadounidenses serían invalidadas si se impugnaran ante los tribunales.¹ En efecto, durante muchos años de la década de 2010, aproximadamente la mitad de todas las patentes de programas llevadas a los tribunales fueron anuladas e invalidadas. La Oficina de Patentes y Marcas de Estados Unidos tiene un historial notorio de aprobar patentes ridículas, incluyendo productos como reposacabezas para urinarios y olores que supuestamente curan la impotencia masculina. La financiación de I+D es otra métrica que se ha utilizado para estudiar la innovación tecnológica. No obstante, también tiene muchos problemas. Gastar mucho dinero en perseguir un objetivo tecnológico no siempre conduce a la innovación. Basta con ver el dinero que se ha desperdiciado en la fusión nuclear sin resultados concretos. Además, las empresas suelen jugar con el significado de I+D. Las empresas farmacéuticas gastan la mayor parte de sus fondos de «investigación» en desarrollar variantes de medicamentos ya existentes para poder ampliar la protección de las patentes que, de otro modo, expirarían, lo que supone una grave amenaza para sus beneficios.² Estudios independientes demuestran que estas variantes casi nunca son más eficaces que las versiones anteriores de los medicamentos, aunque la industria financia muchos de sus propios estudios defectuosos que acaban llegando a la FDA. Las grandes farmacéuticas dan entonces un giro y argumentan que se merecen sus ridículas ganancias porque gastan mucho en innovación. La verdad es que gran parte de lo que se etiqueta como «financiación de I+D» se destina a proyectos que no tienen un impacto directo en el cambio tecnológico. Y, por último, hay un cuento común que merece ser mencionado en la teoría neoclásica del crecimiento: la productividad total de los factores (PTF). Se supone que es la parte del crecimiento económico que no puede explicarse por los insumos de mano de obra y capital. A efectos prácticos, se entiende como la parte del crecimiento económico que se explica por el progreso tecnológico y la innovación. En realidad, no es más que un factor algebraico que aparece en las funciones neoclásicas de «producción» agregada, que no revelan nada sobre la producción porque son poco más que identidades contables que son ciertas por

¹ Shawn Miller, "Where's the Innovation? An Analysis of Quantities and Qualities of Anticipated Obvious Patents," *Virginia Journal of Law and Technology* 18 (2013).

² Véase Donald Light and Rebecca Warburton, "Demythologizing the high costs of pharmaceutical research," *BioSocieties* 6 (2011): 34-50.

definición.³ La PTF es quizás la vergüenza intelectual más flagrante de la macroeconomía moderna. No implica absolutamente nada sobre la innovación tecnológica y, por lo tanto, nunca debería volver a aparecer en ningún debate serio sobre el tema.

Teorías Sobre el Cambio Tecnológico

El tema de la innovación tecnológica ha suscitado numerosas teorías. La tecnología se ha analizado desde todo tipo de perspectivas, desde una forma de conocimiento hasta un conjunto particular de ejemplos empíricos. El historiador Alex Roland definió la tecnología como la manipulación sistemática y orientada a objetivos del mundo natural, y escribió que la tecnología «tiene cuatro componentes: materiales, técnica, energía y herramientas o máquinas». Por lo tanto, la tecnología es el proceso de aplicar energía mediante alguna técnica a través de alguna herramienta o máquina para alterar algún material de alguna manera útil.⁴ Se trata de una concepción muy mecanicista de la tecnología como herramientas y técnicas que se aplican para cambiar algún material subyacente. Un ejemplo histórico de esta concepción sería la adopción del arado pesado en la Europa medieval, que provocó un gran aumento de la productividad agrícola y del crecimiento demográfico, según la historiadora Lynn White y otros académicos.⁵ Otro famoso historiador del desarrollo tecnológico, Thomas Hughes, afirmó que la tecnología es «el esfuerzo por organizar el mundo para resolver problemas, de modo que se puedan inventar, desarrollar, producir y utilizar bienes y servicios».⁶ Este tipo de visión alude a los aspectos más sociales, económicos e incluso políticos del desarrollo tecnológico. Siguiendo esta línea de pensamiento, el teórico Langdon Winner sugirió que los sistemas tecnológicos son la encarnación de las relaciones sociales, incluso de las políticas. Afirmó que las tecnologías son formas de vida y que «no utilizamos las tecnologías tanto como las vivimos». Uno empieza a pensar de forma diferente sobre las herramientas cuando se da cuenta de que estas incluyen a las personas como partes funcionales.⁷ Los pensadores socialistas también han contribuido en gran medida a nuestra comprensión de cómo se relaciona la tecnología con el trabajo y las clases sociales. En el volumen 1 de *El Capital*, Marx analizó magistralmente el papel de la tecnología en el proceso de producción, argumentando que los capitalistas utilizan la automatización como una forma de sustituir o controlar su mano de obra, reduciendo así los costes laborales y aumentando temporalmente los beneficios.

Los teóricos de los sistemas complejos consideran el proceso de cambio tecnológico como un conjunto de interacciones entrelazadas entre diversos componentes, agentes, grupos sociales e instituciones. Thomas Hughes introdujo el concepto de saliente reverso, que es un componente de un sistema tecnológico que funciona de forma anómala y, por lo tanto, impide el pleno desarrollo del sistema. Un ejemplo histórico importante de saliente reverso fueron las calderas utilizadas en las primeras máquinas de vapor. Debido a que las primeras calderas dependían de metales de baja calidad y técnicas de construcción deficientes, no podían soportar completamente el funcionamiento de las máquinas de vapor de alta presión, en gran parte porque el gas a alta presión se filtraba a través de pequeñas grietas y hendiduras, provocando explosiones masivas. No fue hasta principios del siglo XIX cuando las ferrerías industriales mejoraron lo suficiente como para permitir la construcción de calderas cuasiestables, lo que facilitó en parte la difusión de la energía de vapor a alta presión. Una de las teorías más populares sobre el desarrollo tecnológico es la dependencia de la trayectoria. Según este punto de vista, el desarrollo de la tecnología sigue un patrón histórico claro, lo que implica que

³ Véase Jesus Felipe and F. Gerard Adams, "The Estimation of the Cobb-Douglas Function: A Retrospective View," *Eastern Economic Journal* 31 (2005): 427-45.

⁴ Steven Pomeroy, *An Untaken Road* (Annapolis, MD: Naval Institute Press, 2016), 19.

⁵ Lynn White Jr., *Medieval Technology and Social Change* (London: Oxford University Press, 1962). See also Thomas Barnebeck Andersen, Peter Sandholt Jensen, Christian Volmar Skovsgaard, "The heavy plow and the agricultural revolution in Medieval Europe," *Journal of Development Economics* 118 (2016): 133-49.

⁶ Brian C. Black, *To Have and Have Not: Energy in World History* (Lanham, MD: Rowman & Littlefield, 2022), 110.

⁷ Véase Langdon Winner, "Artifice and Order," in *Technology and Values*, ed. Craig Hanks (Oxford: Wiley-Blackwell, 2010), 82.

el futuro depende del pasado. En otras palabras, la historia importa. La innovación de las herramientas, los productos y los métodos futuros es consecuencia del desarrollo de las herramientas, los productos y los métodos anteriores; hay una «trayectoria» de unos a otros, por así decirlo. Un ejemplo clásico, aunque controvertido, de dependencia de la trayectoria es el teclado QWERTY, que sigue utilizándose a pesar de la mayor eficiencia de otros teclados alternativos.

El punto básico es que el cambio tecnológico es generalmente gradual, aditivo y acumulativo, no repentino y revolucionario. Rara vez se inventa algo completamente nuevo; en cambio, los componentes tecnológicos existentes se combinan e integran en dispositivos y diseños híbridos, que pueden considerarse nuevos en el sentido de que realizan funciones novedosas o resuelven problemas anteriormente irresolubles. Consideremos el volante, una de las tecnologías más simples pero más poderosas que los seres humanos han creado jamás. Un volante de inercia es un disco giratorio que se utiliza para conservar la energía cinética rotacional. Los volantes de inercia se utilizan básicamente en dispositivos que giran para ayudar a modular su velocidad de rotación. A lo largo del tiempo, los volantes de inercia se han acoplado a tornos de alfarería, molinos de agua, máquinas de vapor y motores de combustión interna. El motor de su coche tiene uno ahora mismo. Cada vez que arranca el motor y comienza a conducir, los pistones impulsados por las bielas de combustión hacen girar un mecanismo de cigüeñal que está conectado a un volante. El volante metálico ayuda a conservar la energía rotacional del cigüeñal incluso cuando ya no se pisa el acelerador, lo que evita que el motor se cale y proporciona una conducción suave. El cigüeñal en sí mismo es otro gran ejemplo, ya que existe al menos desde la Edad Media y se ha utilizado ampliamente para convertir el movimiento lineal alternativo en movimiento rotacional para múltiples dispositivos y componentes mecánicos.

Otras teorías populares sostienen que el cambio tecnológico es evolutivo; al igual que los organismos que se adaptan bien a su entorno sobrevivirán y producirán descendencia, los sistemas tecnológicos seleccionados por su entorno social más amplio sobrevivirán, mientras que otros desaparecerán. En efecto, las teorías sobre la tecnología han sido ampliamente moldeadas e influenciadas por el trabajo de numerosos biólogos. Humberto Maturana y Francisco Valero introdujeron el concepto de autopoiesis para describir los sistemas que son capaces de autorreproducir sus elementos y partes, como las células.⁸ Por el contrario, los sistemas alopoieticos utilizan energía y recursos para producir otras cosas, como una fábrica que produce automóviles. Toda una economía puede considerarse un sistema autopoyético compuesto por componentes alopoyéticos. En un esfuerzo por describir mejor cómo funciona la vida, el biólogo Stuart Kauffman introdujo la idea de los conjuntos autocatalíticos impulsados por gradientes.⁹ Un conjunto autocatalítico es una colección de moléculas que experimentan reacciones químicas a través de una secuencia de procesamiento impulsada por gradientes con el entorno externo. En este contexto, el término «secuencia de procesamiento» significa una activación secuencial de reacciones bioquímicas que producen moléculas especiales que catalizan o aceleran aún más al menos una de las reacciones del conjunto. El gradiente externo sigue impulsando este bucle de retroalimentación autoorganizado proporcionando los flujos de energía necesarios, sin los cuales los conjuntos autocatalíticos no podrían activarse. El entorno más amplio es absolutamente crítico para configurar las funciones y procesos físicos de todos los conjuntos autocatalíticos. El modelo de ciclo de flujo de la síntesis ecodinámica es muy análogo, ya que los flujos de energía natural son, de hecho, gradientes biofísicos que facilitan la evolución dinámica de nuestras redes de conversión, que operan a través de secuencias de activación globalmente coherentes, o patrones modales que son el equivalente a los conjuntos autocatalíticos para los sistemas energéticos antropogénicos a gran escala.

⁸ Véase Humberto Maturana y Francisco Valero, *Autopoiesis and Cognition* (Dordrecht: D. Reidel Publishing Company, 1980).

⁹ Stuart Kauffman, "Autocatalytic sets of proteins," *Journal of Theoretical Biology* 119 (1986): 1-24.

Adaptación Modal y Espectralización de Conversión (AMEC): La Relación entre el Cambio Tecnológico y el Crecimiento

La ecología es la matriz causal fundamental detrás de los principales cambios históricos en la sociedad humana. Los mundos social y natural son sistemas dinámicos altamente complejos y no lineales que están entrelazados a través de

La ecosfera es capaz de gestionar y asimilar una gran cantidad de residuos humanos y energía de baja calidad sin desestabilizarse gravemente. Sin embargo, nuestra era actual de capitalismo industrial está poniendo a prueba esa proposición de todas las formas posibles.

intrincados bucles de retroalimentación. Recordemos que todas las economías son sistemas disipativos: absorben grandes cantidades de energía del mundo natural, utilizan una parte de esa energía para organizar y mantener su estructura interna, y devuelven la mayor parte de la energía consumida a los sumideros naturales de la ecosfera global.

La ecosfera es capaz de gestionar y asimilar una gran cantidad de residuos humanos y energía de baja calidad sin desestabilizarse gravemente. Sin embargo, nuestra era actual de capitalismo industrial está poniendo a prueba esa proposición de todas las formas posibles. Si la energía «inútil» vertida por la civilización en el mundo natural desborda la capacidad de los sumideros y depósitos naturales, el resultado será el caos en toda la biosfera global, mucho más grave que el que ya hemos visto en los últimos tiempos. Para ayudar a prevenir esa posibilidad aleccionadora, necesitamos comprender cómo la dinámica biofísica del cambio tecnológico afecta a la dinámica de escala de las expansiones y contracciones energéticas. Al estabilizar y modular eficazmente esa dinámica de escala, podemos en efecto prevenir la mayoría de los impactos nocivos asociados a la reciente perturbación bionómica, al tiempo que garantizamos la prosperidad de la civilización global durante los próximos milenios.

Comencemos con la teoría ecodinámica del cambio tecnológico y el desarrollo económico, que funciona de la

Los detonantes ecológicos provocan cambios en la base de recursos subyacente o en las relaciones laborales y los patrones modales que se han desarrollado en torno a las bases de recursos existentes.

siguiente manera. En primer lugar, los detonantes ecológicos provocan cambios en la base de recursos subyacente o en las relaciones laborales y los patrones modales que se han desarrollado en torno a las bases de recursos existentes. Una base de recursos es cualquier

conjunto de suministros de energía primaria natural disponibles para su extracción, incluyendo cosas como los combustibles fósiles, la energía eólica, la energía solar y la energía hidráulica. Un ejemplo importante de detonante ecológico es el calentamiento que se produjo después de la última Edad de Hielo, que provocó la proliferación de plantas, animales, ríos y lagos en todo el mundo, convirtiéndose así en el factor dominante en la transición de una existencia nómada a una agrícola. Otro ejemplo es el brote de una epidemia importante, que puede causar un gran número de muertes y cambiar la forma en que los individuos supervivientes trabajan y utilizan la tecnología. La peste negra es un ejemplo importante de este tipo de proceso histórico, ya que la extrema escasez de mano de obra que provocó en Europa occidental condujo a la proliferación de tecnologías que ahorraban mano de obra. Los detonantes ecológicos y las perturbaciones pueden cambiar la base de recursos subyacente mediante la diversificación o la escasez inducida. «Cuando los recursos existentes escasean, las sociedades suelen intentar compensarlo comerciando con otras, cambiando a nuevos recursos o explorando y luchando para hacerse con el control de recursos adicionales. Cuando los recursos naturales se multiplican y diversifican, las sociedades suelen tener más materiales que recolectar, procesar y gestionar. La nueva base de recursos suele tener cualidades y características energéticas diferentes a las de la antigua, como diferentes densidades de energía y potencia o diferentes distribuciones espaciales. El cambio en la calidad de la energía produce entonces un cambio en los flujos modales y las relaciones laborales, sobre todo porque las personas

necesitan llevar a cabo adaptaciones modales para extraer y procesar los nuevos recursos para necesidades sociales predefinidas. El auge de la industrialización en Inglaterra durante los siglos XVII, XVIII y principios del XIX es un ejemplo histórico importante de este proceso, que trataré en profundidad en el capítulo 9. Estos cambios ecológicos y sociales más amplios pueden provocar muchos tipos de cambios en el desarrollo tecnológico, pero hay uno en particular que es fundamental para la evolución de todos los sistemas económicos: los cambios en la forma de convertir la energía.

Denominaré a este proceso «espectralización», definiéndola como la diversificación y variación de los métodos de conversión de las tecnologías existentes en respuesta a las situaciones sociales y ecológicas cambiantes. Un ejemplo moderno de espectralización conversional ha sido la transición de los vehículos propulsados por gas a los vehículos eléctricos propulsados por baterías, ya que implica un cambio en la forma en que los coches convierten la energía mientras se desplazan y realizan otras funciones. Otro ejemplo de espectralización fue la aparición de turbinas eólicas y paneles solares para producir electricidad, un cambio notable con respecto a los métodos de conversión utilizados por las centrales eléctricas de carbón, que dependen de la quema de carbón para generar vapor caliente que impulsa una turbina. Pero no todos los cambios en las formas tecnológicas son de naturaleza de conversión. Durante aproximadamente una década, los automóviles Modelo T de Ford solo se pintaban de negro porque resultaba ser la opción más barata. En la década de 1920, el aumento de la competencia de otros fabricantes de automóviles persuadió a Ford para que utilizara una gama más amplia de colores. Pero la transición de los coches negros a los de colores no es una espectralización de conversión, porque no hubo cambios en los métodos subyacentes de conversión de energía. Otro ejemplo de algo que no es espectralización de conversión son las fundas para teléfonos inteligentes; cambian constantemente sin que se produzcan cambios correspondientes en las tecnologías subyacentes que impulsan el funcionamiento de los teléfonos inteligentes. Del mismo modo, las cadenas logísticas, como las carreteras y los ferrocarriles, no convierten energía por sí mismas, sino que simplemente facilitan la conversión de energía por parte de otras tecnologías, como los automóviles y los trenes. La espectralización puede producirse a diferentes escalas económicas y vectores de implementación. En cuanto a la escala, podemos hablar de espectralización a nivel micro, que afecta a los procesos de conversión de tecnologías específicas, o de espectralización a nivel macro, que puede referirse a transiciones de conversión para economías enteras, como cuando los trenes y los automóviles sustituyeron gradualmente a los caballos para el transporte personal. A nivel conceptual, también es importante diferenciar la espectralización del concepto similar de difusión tecnológica. Este último concepto se refiere a la difusión y adopción de una forma tecnológica ya existente en toda la sociedad. Por el contrario, *la espectralización se refiere a la aparición y creación iniciales de nuevas tecnologías de conversión*. Otra diferencia importante es que, aunque la difusión puede aplicarse a cualquier tecnología, la espectralización es algo que se aplica específicamente a los nuevos métodos tecnológicos de conversión de energía. No obstante, ambos conceptos pueden solaparse de manera significativa en determinadas ocasiones, sobre todo porque la difusión de tecnologías preexistentes en toda la sociedad puede afectar a la espectralización de nuevos métodos de conversión.

Los ejemplos anteriores pretenden reforzar la idea básica de que hay muchos cambios económicos y tecnológicos que no implican una espectralización de conversión. No obstante, aunque no todas las innovaciones tecnológicas son espectralizaciones ni implican espectralización, es cierto que la espectralización es el impulsor principal de la innovación tecnológica, ya que todos los sistemas económicos son redes de conversión y, por lo tanto, los cambios en las tecnologías de conversión que alimentan esas redes tendrán efectos masivos en las propiedades agregadas de las propias coronas. La idea central detrás de la espectralización es que la variedad de conversión supera los obstáculos técnicos al canalizar, modular y convertir los flujos de energía con el fin de alcanzar diferentes objetivos sociales. Las personas crean herramientas, máquinas y dispositivos con nuevas vías de conversión para superar diversas limitaciones

energéticas y retos de ingeniería. Las tecnologías espectralizadas se utilizan para sortear puntos de estrangulamiento, cuellos de botella y salientes invertidos mediante la síntesis de componentes y dispositivos preexistentes en combinaciones novedosas. El marco teórico de la adaptación modal y la espectralización de conversión (AMEC) describe el cambio tecnológico como una respuesta caótica y dinámica a la convergencia de las situaciones sociales y ecológicas. A medida que estas situaciones cambian, las personas responden adaptando y modificando sus flujos modales y sus relaciones laborales. Estas adaptaciones pueden dar lugar a cambios en los métodos aplicados a las tecnologías preexistentes o al desarrollo gradual de tecnologías completamente nuevas, que surgen como soluciones contingentes a diversos problemas que se descubren durante la implementación recursiva y diferencial de nuevos patrones y flujos modales. A través de este proceso de adaptación modal, las personas desarrollan nuevos métodos biofísicos para recolectar, extraer y convertir los recursos naturales en productos acabados. La adaptación modal y la espectralización de conversión son los dos elementos fundamentales del crecimiento tecnológico y la innovación. En el marco AMEC, las adaptaciones modales y la espectralización forman un bucle de retroalimentación sinérgica en el que los cambios en las adaptaciones pueden impulsar las espectralizaciones y, del mismo modo, los cambios en las espectralizaciones pueden provocar cambios en las adaptaciones.

Las vías causales por las que la espectralización supera las limitaciones energéticas pueden ser muy diversas. Por ejemplo, se puede modificar un dispositivo para convertir la energía de forma más eficiente o se puede modificar un vehículo para transportar más mercancías utilizando el mismo volumen de espacio, lo que permite ahorrar en costes de producción. Pero la espectralización también puede simplemente producir niveles más altos de exergía [energía disponible] y energía útil sin que se produzca un aumento correspondiente de la eficiencia.

Del mismo modo, las tecnologías espectralizadas pueden generar ganancias tanto en eficiencia como en exergía a lo largo del tiempo. La espectralización puede conducir así a la expansión de un sistema energético mediante ganancias impulsadas por la eficiencia, ganancias impulsadas por la exergía, ambas juntas, o mediante expansiones exergéticas que sean suficientes para compensar cualquier disminución correspondiente en la eficiencia. La espectralización puede impulsar las ganancias en eficiencia y productividad porque da a las personas más control sobre el flujo de energía. Los incentivos económicos y las estructuras socioinstitucionales ejercen entonces presiones de selección que dan lugar a la proliferación de determinadas vías de conversión frente a otras, lo que conduce a la estandarización de tecnologías y dispositivos que llegan a dominar una red de conversión y, por lo tanto, el sistema económico en general. El resultado final es que las altas tasas de espectralización generalmente amplían la escala de un sistema energético. Sin embargo, las formas de espectralización de conversión que están cuidadosamente guiadas y controladas por la combinación adecuada de factores sociales no necesariamente tienen que producir sistemas energéticos más grandes. No hay una teleología inherente ni un estado final en lo que la espectralización hace por la sociedad; puede producir diferentes resultados dependiendo de cómo la guíemos en el futuro. La espectralización de los métodos y dispositivos de conversión puede dar lugar a muchos tipos de cambios en toda la sociedad, incluidos los relacionados con las infraestructuras y los entornos construidos, como la aparición de los ferrocarriles tras la invención de las máquinas de vapor de alta presión o la construcción de carreteras y autopistas pavimentadas tras la invención de los automóviles. Las infraestructuras suelen desarrollarse en respuesta a la espectralización de las tecnologías de conversión, ya que la sociedad adapta los sistemas logísticos y de transporte para facilitar el auge de una nueva red de conversión.

Ya sea por el auge de los molinos de agua y los molinos de viento o por el desarrollo de las máquinas de vapor y los ordenadores personales, la espectralización de la tecnología ha dado lugar, en general, aunque no siempre, a sociedades más intensivas en energía. Para comprender por qué las espectralizaciones inflan la dinámica de escala de las coronas energéticas, es útil saber que los métodos de conversión están muy entrelazados con las actividades

económicas ascendentes y descendentes. Por ejemplo, un proceso de conversión de cualquier dispositivo requiere aportes de energía, ya que implica la conversión de energía de una forma inicial a otra. Por lo tanto, un proceso de conversión espectralizado diferente puede requerir aportes diferentes. Esos nuevos aportes deben extraerse, procesarse o distribuirse utilizando métodos diferentes, y la ejecución de esos métodos requiere más energía. Este rendimiento adicional aumentará la TFA de la economía, a menos que haya efectos de reducción de escala correspondientes en otros sectores. Es más, los resultados del proceso espectralizado también pueden cambiar, y entonces tendrían que distribuirse

En el capitalismo moderno, este proceso de difusión y gestión tecnológica se desarrolla debido a diversos mecanismos de selección social guiados por la dinámica del conflicto de clases, el poder social y las rivalidades geoestratégicas.

y consumirse mediante diferentes adaptaciones modales en los nodos de una corona determinada. Por supuesto, la espectralización comienza en el nivel de los dispositivos y componentes individuales. Pero estas espectralizaciones a nivel micro pueden afectar profundamente a la dinámica de escala de las redes de conversión si logran difundirse ampliamente

por toda la economía. En el capitalismo moderno, este proceso de difusión y gestión tecnológica se desarrolla debido a diversos mecanismos de selección social guiados por la dinámica del conflicto de clases, el poder social y las rivalidades geoestratégicas. Este proceso se describe con mucho más detalle en el capítulo 8.

Para comprender mejor los efectos de la espectralización en la dinámica de la escala energética, consideremos un ejemplo concreto: la transición a nivel macro hacia fuentes de energía renovables como la eólica, la solar y la hidráulica. En 2021, las energías renovables proporcionaban un impresionante 28 % de la generación total de electricidad del mundo, frente al 20 % de solo once años antes.¹⁰ La tasa de crecimiento en las últimas décadas ha sido asombrosa. Esta transición a nivel macro en la economía mundial está impulsada por numerosas espectralizaciones a nivel micro que involucran tecnologías como baterías eléctricas, turbinas eólicas y paneles solares. También está cambiando la dinámica de insumos y extracción de la que depende la economía mundial, ya que los insumos primarios de las nuevas coronas están pasando de fuentes basadas en combustibles a fuentes basadas en materiales. Las tecnologías renovables dependen en gran medida de minerales críticos como el cobalto, el litio, el níquel, el cobre y los elementos de tierras raras, incluidos el itrio, el escandio y los lantánidos.¹¹ Según la Agencia Internacional de la Energía, un vehículo eléctrico típico requiere seis veces más insumos minerales que un vehículo convencional de gasolina.¹² Una planta eólica terrestre típica necesita nueve veces más minerales que una central eléctrica convencional de gas.¹³ Desde 2010, cada nueva unidad de generación de energía ha requerido, de media, un 50 % más de recursos minerales.¹⁴ Pero, a pesar de la impresionante magnitud de esta transición, el mundo sigue consumiendo más energía, emitiendo más gases de efecto invernadero y batiendo nuevos récords en la concentración atmosférica de dióxido de carbono y otros gases de efecto invernadero. Esto se debe en gran parte a que la transición a las energías renovables sigue dependiendo en gran medida de los combustibles fósiles, ya que los minerales en bruto se extraen y transportan utilizando vehículos que funcionan con combustibles fósiles. Del mismo modo, las turbinas eólicas y los paneles solares siguen fabricándose en gran medida en fábricas que funcionan con electricidad generada por centrales eléctricas de carbón y gas. Además, la distribución de toda la nueva electricidad producida por los parques eólicos y solares requerirá la instalación de capacidad adicional en la red. Esta barrera distributiva ha sido un problema importante en los Estados

¹⁰ IEA, World Energy Outlook 2022 (Paris: IEA, 2022), 279, <https://www.iea.org/>.

¹¹ El término «elementos de tierras raras» es engañoso, ya que muchos de estos elementos no son escasos en absoluto. Algunos de ellos son mucho más abundantes que otros como el cobre y el oro. Se denominan «tierras raras» porque, a diferencia de otros metales, no se concentran en grandes cantidades en los yacimientos minerales. En cambio, se encuentran dispersos por toda la Tierra en concentraciones más pequeñas. Los lantánidos son 15 elementos metálicos que van desde el lantano al lutecio en la tabla periódica, con números atómicos del 57 al 71.

¹² IEA, The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions (Paris: IEA, 2021), 5, <https://www.iea.org/>.

¹³ Ibid.

¹⁴ Ibid.

Unidos, ya que miles de proyectos de energía renovable se han retrasado debido a la mala gestión burocrática y a una red eléctrica insuficiente.¹⁵ Menos del 20 % de todos los proyectos eólicos y solares propuestos en los Estados Unidos llegan a buen término.¹⁶

Las espectralizaciones a nivel micro afectan a los dispositivos individuales que interactúan dentro de una corona más amplia, como los motores primarios. En términos generales, un motor primario es cualquier fuente inicial de energía motriz, como un molino de viento o un motor de combustión interna, que recibe un flujo de energía y luego utiliza esa energía para accionar maquinaria o realizar otras tareas. En ingeniería, concretamente, los motores primarios son motores que convierten el combustible en energía útil. A los efectos que nos ocupan, definiré los motores primarios como los convertidores de energía dominantes de una economía determinada; en otras palabras, son los dispositivos que consumen más energía en la economía. Los motores primarios han cambiado radicalmente a lo largo del tiempo, tal y como documenta Vaclav Smil en *Energy and Civilisation*. Durante gran parte de la historia de la humanidad, los músculos humanos proporcionaban la máxima potencia disponible, aproximadamente 100 vatios (W). Los animales de tiro, como los bueyes y los caballos, alcanzaban unos 400 W en el tercer milenio antes de Cristo. En el año 1000 d. C., las ruedas hidráulicas horizontales se habían convertido en los principales motores primarios, generando unos 5000 W de potencia. En 1800, las máquinas de vapor más grandes superaban los 100 000 W y mantuvieron su dominio durante gran parte del siglo XIX. En épocas más recientes, las turbinas de vapor se han convertido en las principales fuentes de energía, con las unidades más grandes produciendo más de 1 GW, o un millardo de vatios. A diferencia de las fuentes de energía, los dispositivos contingentes son aparatos de relativamente baja energía que dependen de las fuentes de energía para convertir con éxito la energía y funcionar con normalidad. Un ordenador personal es un buen ejemplo de dispositivo contingente. Funciona en parte gracias a las enormes turbinas de vapor que producen grandes cantidades de electricidad, que luego se distribuye a través de diversos flujos modales a los diferentes distritos residenciales, comerciales e industriales de una economía. Los automóviles y vehículos personales son otro ejemplo común de tecnologías contingentes; solo pueden funcionar gracias a combustibles altamente procesados o portadores de carga eléctrica que han pasado por múltiples etapas de conversión en sus flujos modales a lo largo de la economía. Las máquinas industriales también pueden considerarse contingentes y, en ese sentido, los contingentes actúan sobre las materias primas para crear productos de manufactura acabados que se venden en los mercados regionales y mundiales.

La espectralización de los motores primarios puede tener importantes efectos posteriores en la actividad económica, ya

La tecnología existe en el contexto de los mercados financieros y de materias primas, que están controlados y diseñados por determinados grupos para obtener determinados resultados.

que los motores primarios dictan de hecho la capacidad de energía de todo el sistema. Sin embargo, la espectralización de los contingentes también puede afectar profundamente a la espectralización de los motores primarios. Esto se debe a que la tecnología existe en el contexto de los mercados financieros

y de materias primas, que están controlados y diseñados por determinados grupos para obtener determinados resultados. Por lo tanto, los flujos modales y los ciclos dinámicos del capitalismo moderno se organizan con el fin de producir y entregar grandes volúmenes de dispositivos y productos contingentes de manera oportuna y eficiente.

En los últimos dos siglos, hemos vivido bajo un régimen tecnológico intensivo en energía de espectralización catalítica. La espectralización de la tecnología bajo el capitalismo es catalítica principalmente de dos maneras. En primer lugar, el aumento de la espectralización tiene el efecto de acelerar e intensificar los flujos modales a través de las coronas de una

¹⁵ Brad Plumer, "The U.S. Has Billions for Wind and Solar Projects. Good Luck Plugging Them In," *New York Times*, February 23, 2023.

¹⁶ *Ibid.*

economía determinada. En otras palabras, los procesos de conversión bajo el capitalismo se modifican para ampliar y acelerar los ciclos de producción y distribución. Esto se debe a que la espectralización suele conducir a una mayor demanda de servicios energéticos para construir, operar y mantener las tecnologías espectralizadas. Mientras tanto, las tecnologías o los sistemas energéticos más antiguos no desaparecen, sino que simplemente se desplazan y transfieren con el fin de lograr otras tareas y objetivos. Las civilizaciones modernas ya no necesitan caballos para el transporte, ya que los vehículos terrestres y los aviones han tomado el relevo, pero los caballos siguen utilizándose para carreras competitivas y otros eventos comerciales. En segundo lugar, las economías capitalistas suelen ser catalizadoras, en el sentido de que las innovaciones tecnológicas en un sector económico a menudo catalizan y aceleran los cambios y las innovaciones en otros sectores, ampliando así la escala energética del sistema en su conjunto. Por poner un ejemplo común, si una empresa o un sector económico concreto espectraliza una tecnología determinada que reduce los costes de producción, otras empresas y sectores seguirán inevitablemente su ejemplo para seguir siendo competitivos. El resultado no es solo que las tecnologías espectralizadas se difundan por toda la economía y, por lo tanto, consuman más energía, sino que el aumento de la tasa de espectralización en sí mismo se convierte en una característica importante del desarrollo económico bajo el capitalismo. Incluso en presencia de ganancias de eficiencia en toda la economía, las mayores tasas de espectralización bajo el capitalismo aumentarán la escala energética agregada de nuestra civilización, lo que impondrá una mayor presión y más perturbaciones en los ciclos naturales de la biosfera. Estas intensas perturbaciones repercutirán entonces en la propia civilización humana, haciendo que se doblegue y se doble ante toda la presión ecológica colectiva que se está acumulando rápidamente.

Eficiencia e Innovación Tecnológica

Hoy en día, muchas personas creen que podemos gestionar y mitigar cuidadosamente la crisis ecológica a la que nos enfrentamos mediante innovaciones tecnológicas inteligentes. Uno de los argumentos más populares dentro de los círculos del tecnocapitalismo es la idea de que la civilización puede seguir funcionando gracias a las ganancias en eficiencia energética. La idea de que podemos hacer más con menos es seductora, pero hay varias razones por las que esta estrategia fracasará a largo plazo, si decidimos seguir aplicándola. La razón más fundamental es que la naturaleza impone límites físicos absolutos a la eficiencia que ningún avance tecnológico puede superar. El reciente colapso de la ley de Moore debido a los efectos cuánticos es un ejemplo notable.¹⁷ Otro es la barrera de eficiencia que el ciclo de Carnot representa para todos los motores térmicos prácticos.¹⁸ En segundo lugar, incluso si la eficiencia agregada mejora

Las ganancias de eficiencia agregada para economías enteras casi siempre están asociadas con niveles más altos de uso y consumo de energía, no menores.

gracias a innovaciones tecnológicas sorprendentes, es probable que lo haga demasiado lentamente, dadas las limitaciones de tiempo para implementar las nuevas y ambiciosas políticas energéticas necesarias para

sacarnos del lío en el que nos encontramos. Y en tercer lugar, las ganancias de eficiencia agregada para economías

¹⁷ Tom Simonite, «Moore's Law Is Dead. Now What?» (La ley de Moore ha muerto. ¿Y ahora qué?), MIT Technology Review, 13 de mayo de 2016, <https://www.technologyreview.com/>. La ley de Moore es la observación de que el número de transistores en un circuito integrado debería duplicarse cada dos años, algo que en efecto ocurrió durante varias décadas. Pero a medida que se concentran más y más transistores en la misma área, los electrones comienzan a atravesar diferentes regiones del semiconductor y debilitan o interrumpen la fidelidad de las corrientes eléctricas necesarias para el cálculo lógico. Los fabricantes de chips y las empresas tecnológicas están buscando formas de sortear estas limitaciones cuánticas. Un método que han utilizado es simplemente hacer chips de ordenador más grandes; esa es la estrategia que adoptó NVIDIA con su chip de IA de última generación, llamado Blackwell, que hizo su debut público en 2024 y se espera que albergue el asombroso número de 208 000 millones de transistores en una sola unidad, lo que lo convierte, en el momento de escribir este texto, en el chip de ordenador más potente del mundo. Pero la estrategia más amplia ha consistido en recurrir a la computación acelerada y paralela, que se caracteriza por la distribución de las tareas de computación entre múltiples núcleos integrados en el mismo mainframe. Al repartir las operaciones de computación intensivas entre diferentes chips informáticos que trabajan juntos, es posible generar velocidades de computación ultrarrápidas incluso con las limitaciones que frenan la ley de Moore.

¹⁸ Peter Atkins, *Four Laws That Drive the Universe* (Oxford: Oxford University Press, 2007), 51-52. El límite de Carnot, o eficiencia de Carnot, es la mayor eficiencia posible que puede alcanzar un motor termodinámico ideal. Dado que los motores reales, por definición, no son ideales, nunca podrán superar la barrera de eficiencia del límite de Carnot.

enteras casi siempre están asociadas con niveles más altos de uso y consumo de energía, no menores. Esta última afirmación parece muy paradójica, así que exploremosla primero.

A veces recorremos distancias más largas cuando mejora la eficiencia energética. A menudo utilizamos más electrodomésticos cuando la electricidad se abarata. Quienes se enorgullecen de ahorrar energía en casa, mediante el reciclaje y otras actividades similares, están más que felices de tomarse unas vacaciones subiéndose a un avión y volando al otro lado del mundo. La gente suele ahorrar energía en un ámbito y gastarla en otro. Lo que acabamos haciendo con las ganancias en eficiencia energética puede ser a veces tan importante como las propias ganancias. En los estudios

El aumento de la eficiencia energética se utiliza generalmente para ampliar la acumulación y la producción, lo que conduce a un mayor consumo de los mismos recursos que se suponía que las mejoras en la eficiencia iban a conservar.

ecológicos, este fenómeno se conoce generalmente como la paradoja de Jevons, que revela que los efectos previstos de las mejoras en la eficiencia no siempre se materializan.¹⁹ Formulada por primera vez en el siglo XIX por el economista británico William Stanley Jevons, la paradoja afirma que el aumento de la eficiencia energética se utiliza generalmente para ampliar la acumulación y la producción, lo que conduce a un mayor consumo de los mismos recursos que se suponía que las mejoras en la eficiencia iban a conservar. El argumento que sustenta la paradoja es que el aumento de la eficiencia conduce a bienes y servicios más baratos, lo que fomenta una mayor demanda y un mayor gasto, lo que a su vez conduce a un mayor consumo de energía.²⁰ Jevons describió este efecto en el contexto de la energía del carbón y las máquinas de vapor. Observó que las mejoras en la eficiencia de las máquinas de vapor habían fomentado un mayor consumo de carbón en Gran Bretaña, lo que implicaba que el aumento de la eficiencia energética no conducía de hecho a un ahorro de energía.

En economía, las variaciones de esta paradoja se conocen como efecto rebote. Por ejemplo, si un aumento del 5 % en la eficiencia del combustible conduce a una disminución del 2 % en el consumo de combustible, entonces el rebote sería del 60 %. La paradoja de Jevons, también llamada «efecto contraproducente» entre los economistas, se produciría si un aumento en la eficiencia del combustible realmente produjera un aumento en el consumo de combustible. La mayoría de los economistas neoclásicos aceptan que algunos efectos rebote son reales y significativos, pero rechazan en gran medida la noción de efecto contraproducente. Los estudios neoclásicos han concluido que los efectos rebote microeconómicos oscilan entre el 20 % y el 40 %, mientras que los efectos rebote macroeconómicos son mucho mayores, entre el 50 % y el 60 %, aunque en algunos casos podrían alcanzar valores aún más altos.²¹ Cabe destacar que los resultados de estos estudios no son muy útiles, por varias razones. En primer lugar, son muy sensibles al horizonte temporal considerado. Las políticas gubernamentales o las mejoras autónomas en materia de eficiencia podrían dar lugar a un ahorro neto de energía durante unos diez años, para luego tener un efecto contraproducente cincuenta años más tarde. En pocas palabras, los estudios hacen suposiciones sobre los patrones de demanda en la economía que es

Para conceptualizar plenamente la paradoja de Jevons, el límite tiene que incluir toda la economía mundial, o todos y cada uno de los dispositivos que consumen energía.

poco probable que se mantengan durante largos periodos de tiempo. En segundo lugar, estos estudios suelen ser muy deficientes a la hora de discernir los efectos fronterizos. Las políticas o mejoras de eficiencia podrían conducir a un ahorro neto de energía para una empresa en particular, o en un país en

¹⁹ John Bellamy Foster, *Ecology Against Capitalism* (New York: Monthly Review Press, 2002), 94.

²⁰ *Ibid.*

²¹ Para un artículo destacado, véase Kenneth Gillingham, David Rapson, and Gernot Wagner, “The Rebound Effect and Energy Efficiency Policy” *Review of Environmental Economics and Policy* 10 (2016). Also refer to Terry Barker et al., “The macroeconomic rebound effect and the world economy,” *Energy Efficiency* 2 (2009): 411-27.

particular, pero esas mismas mejoras pueden luego extenderse y producir un mayor consumo de energía entre otras empresas y países. Como dice el científico especializado en energía Carey King: Cuanto más pequeño es el límite del sistema utilizado para analizar el efecto contraproducente, menos relevante parece la paradoja. Para conceptualizar plenamente la paradoja de Jevons, el límite tiene que incluir toda la economía mundial, o todos y cada uno de los dispositivos que consumen energía.²² En una revisión exhaustiva de la bibliografía sobre el tema, el moderado Centro de Investigación Energética del Reino Unido afirmó, de forma bastante prematura, que las versiones más extremas del efecto rebote probablemente ya no se aplican a las economías desarrolladas. Sin embargo, el grupo de investigación también argumentó que aún pueden producirse grandes efectos rebote en nuestras economías. La conclusión a la que llegaron fue la siguiente: «Sería erróneo suponer que [...] los efectos rebote son tan pequeños que pueden ignorarse. En algunas circunstancias, como en el caso de las tecnologías energéticamente eficientes que mejoran significativamente la productividad de las industrias intensivas en energía, los efectos rebote en toda la economía pueden superar el 50 % y podrían aumentar la conversión de energía a largo plazo».²³ Incluso si se admitiera que el efecto rebote es imposible, el mero hecho de que sean posibles efectos rebote significativos en toda la economía debería hacernos reflexionar a todos sobre la utilidad de las estrategias de eficiencia para combatir la crisis ecológica y el cambio climático.

A pesar de todos estos matices, gran parte de este argumento es en realidad una cortina de humo. El problema fundamental es que todo el debate oculta una incógnita más importante: la cuestión de si las mejoras en la eficiencia, incluso si no resultan contraproducentes, pueden llegar lo suficientemente rápido como para aliviar las peores consecuencias de la crisis ecológica, que aún están por llegar. En otras palabras, el problema central de este debate es el tiempo. ¿Podemos lograr enormes ganancias de eficiencia en el corto período de tiempo necesario para tomar medidas serias y prevenir algunas de las consecuencias más devastadoras de la perturbación bionómica? ¿Realmente queremos apostar el futuro de la civilización mundial por la promesa marginal de que se pueden lograr ganancias masivas de eficiencia a escala mundial en un par de décadas, contrariamente a todas las pruebas históricas? Dados los incentivos económicos y políticos que prevalecen en nuestra era actual de capitalismo, es poco probable que nuestra pasión por la eficiencia pueda proporcionar soluciones concretas a los profundos retos a los que nos enfrentamos. Esto se debe a que la eficiencia agregada de un sistema económico es una cantidad inercial que cambia a un ritmo glacial, independientemente de si aumenta o disminuye.

Estamos viendo cómo se desarrolla este mismo proceso en la actualidad con las emisiones de gases de efecto invernadero, aunque nuestras crisis ecológicas van mucho más allá de este problema. Los líderes políticos y empresariales llevan años esperando que el progreso tecnológico proporcione de alguna manera unas tasas de crecimiento económico más altas y una reducción drástica de las emisiones de gases de efecto invernadero. Las cosas no han salido según lo previsto. Las Naciones Unidas llevan mucho tiempo advirtiendo de que existe una brecha «inaceptable» entre los compromisos de los gobiernos nacionales y las reducciones de emisiones necesarias para evitar algunas de las peores consecuencias asociadas al cambio climático.²⁴ En 2022, las emisiones de dióxido de carbono alcanzaron un máximo histórico a nivel mundial, desafiando por completo incluso los objetivos relativamente modestos del Acuerdo de París.²⁵ Como era de esperar, los niveles atmosféricos de dióxido de carbono, metano y óxido nítrico — en conjunto, los gases de efecto invernadero más peligrosos — también alcanzaron nuevos máximos en 2022, lo que sentó las bases para un calentamiento global aún mayor en el futuro. Los retos que plantea el aumento de la eficiencia son más fáciles de comprender cuando observamos el capitalismo a escala mundial: empero, aunque muchos países

²² Carey King, *The Economic Superorganism* (New York: Springer International, 2020), 230.

²³ Steven Sorrell, *The Rebound Effect* (London: UK Energy Research Centre, 2007), 92.

²⁴ Fiona Harvey, "UN Warns of 'Unacceptable' Greenhouse Gas Emissions Gap," *The Guardian*, October 31, 2017, <https://www.theguardian.com/us>.

²⁵ Cathy Bussewitz, "Carbon dioxide emissions reached a record high in 2022," *Associated Press*, March 2, 2023.

desarrollados han logrado mejoras modestas pero cuantificables en su eficiencia agregada, estos avances se han visto completamente anulados por las economías en desarrollo que aún se encuentran en proceso de industrialización.²⁶ Es evidente que, bajo el régimen capitalista, es poco probable que se produzcan cambios sustanciales en la eficiencia agregada de la economía mundial en un breve periodo de tiempo. El crecimiento tecnológico bajo el capitalismo aportará algunos avances adicionales en materia de eficiencia, pero sin duda no serán suficientes para evitar las peores consecuencias de nuestras crisis ecológicas.

Una de las mejores formas de comprender la inercia de las eficiencias agregadas es comparar las eficiencias energéticas del capitalismo con las de la época nómada, hace más de 10 000 años. Recordemos que los músculos humanos realizaban la mayor parte del trabajo en las sociedades nómadas, y que la eficiencia de nuestros músculos es de aproximadamente un 20 %, quizá mucho más en circunstancias especiales.²⁷ A modo de comparación, la mayoría de los motores de combustión alimentados con gasolina tienen una eficiencia termodinámica de aproximadamente el 15 %, las centrales eléctricas de carbón tienen una media global de alrededor del 30 % y la gran mayoría de los sistemas fotovoltaicos comerciales se sitúan entre el 15 y el 20 %.²⁸ Existen variaciones en todas estas cifras, dependiendo de una amplia gama de situaciones físicas. No obstante, en lo que respecta a la eficiencia, podemos concluir con seguridad que los principales motores y contingentes del capitalismo difícilmente pueden superar a los músculos humanos, incluso después de tres siglos de rápido progreso tecnológico. Es extremadamente difícil lograr grandes ganancias en eficiencia, tanto en términos físicos como económicos, ya que requieren enormes inversiones y recursos. Aunque en la historia del capitalismo se han producido ocasionalmente impresionantes ganancias de eficiencia, estas siempre han estado subordinadas a los esfuerzos por ampliar la producción de energía útil y la escala de producción en general.

De vez en cuando, surgen innovaciones sorprendentes que establecen nuevos estándares para las tecnologías futuras, pero una innovación sorprendente no representa a toda la economía. La máquina de vapor de Watt supuso una mejora

Una persona que condujera un Tesla habría producido aproximadamente las mismas emisiones de carbono que alguien que condujera un Honda Accord.

importante con respecto a los modelos anteriores, pero su eficiencia térmica era solo del 5 % en el mejor de los casos y su difusión en la economía inglesa fue bastante lenta.²⁹ Por poner otro ejemplo, los motores Tesla tienen una eficiencia operativa fenomenal, pero la electricidad necesaria para hacer funcionar los coches suele proceder

de fuentes mucho menos eficientes, como las centrales eléctricas de carbón. En 2013, una persona que condujera un Tesla en Ohio o Virginia Occidental habría producido aproximadamente las mismas emisiones de carbono que alguien que condujera un Honda Accord, dada la mezcla de energías contaminantes en esos estados.³⁰ La eficiencia agregada de las economías modernas sigue siendo relativamente baja porque los capitalistas de élite están interesados en aumentar sus beneficios y sus niveles de producción, no en realizar las enormes inversiones necesarias para generar mejoras significativas en la eficiencia. Mientras se mantenga el orden económico actual, el capitalismo seguirá prosperando gracias a la expansión a escala energética y a la disipación intensiva, y las mejoras en la eficiencia serán meramente secundarias e incidentales en el proyecto más amplio de saquear el mundo natural y lucrarse con ese

²⁶ Nijavalli H. Ravindranath and Jayant A. Sathaye, *Climate Change and Developing Countries* (New York: Springer, 2006), 35.

²⁷ Zhen-He He et al., "ATP Consumption and Efficiency of Human Single Muscle Fibers with Different Myosin Isoform Composition," *Biophysical Journal* 79 (2000): 945-61.

²⁸ Sobre la eficiencia de los motores de combustión interna, véase Efstathios E. Stathis Michaelides, *Alternative Energy Sources* (New York: Springer, 2012), 411. Para las centrales eléctricas de carbón, véase R. Sandström, "Creep Strength of Austenitic Stainless Steels for Boiler Applications," in *Coal Power Plant Materials and Life Assessment*, ed. A. Shibli (Amsterdam: Elsevier, 2014), 128. Sobre la eficiencia de las células fotovoltaicas, véase Friedrich Sick and Thomas Erge, *Photovoltaics in Buildings* (London: Earthscan, 1996), 14.

²⁹ Robert T. Balmer, *Modern Engineering Thermodynamics* (Cambridge: Academic Press, 2011), 454.

³⁰ Will Oremus, "How Green Is a Tesla, Really?," *Slate*, September 9, 2013, <http://slate.com>.

saqueo. Dado que es poco probable que las ganancias en eficiencia por sí solas mejoren las perspectivas de la civilización mundial ante la disrupción biónómica, debemos pensar de manera más integral sobre la dirección futura del cambio tecnológico y lo que la tecnología debería hacer por la civilización.

La Dirección Futura del Cambio Tecnológico

Preguntarse por el futuro de la tecnología es preguntarse por el futuro de la sociedad en su conjunto. No faltan opiniones y narrativas sobre la dirección futura de la innovación tecnológica.³¹ Hay múltiples bandos en estos debates, y los debates en sí mismos se desarrollan a lo largo de múltiples vectores. Quizás el vector más destacado se dirige a la base de recursos subyacente que la civilización humana debería adoptar en el futuro. En los debates que siguen este vector, hay un bando que ha llegado a la conclusión de que los combustibles fósiles son absolutamente necesarios para el éxito futuro de la civilización humana y, por lo tanto, la forma adecuada de combatir sus efectos nocivos es intervenir

La mayoría de estos debates tienen en común que se desarrollan dentro del marco ideológico de las economías capitalistas.

directamente en la ecosfera, ya sea mediante la gestión de la radiación solar o mediante la eliminación generalizada de gases de efecto invernadero. Estas ideas se conocen colectivamente como geoingeniería, y hablaré más sobre este concepto en breve. Otro

bando sostiene que debemos llevar a cabo una transición rápida y radical para abandonar los combustibles fósiles y pasar a fuentes de energía renovables, como la hidráulica, la eólica y la solar. Otros sostienen que podemos seguir una especie de enfoque híbrido en el que se desarrollen tanto las tecnologías de combustibles fósiles como las renovables, la estrategia de «todo vale». Otro vector del debate se centra en el papel que debe desempeñar la innovación tecnológica como respuesta a nuestra crisis ecológica. El bando más popular en este debate cree que los seres humanos son eternamente inteligentes e ingeniosos; si se combina ese ingenio con el mecanismo social de los mercados capitalistas, la civilización siempre podrá salir de cualquier crisis. Lo que la mayoría de estos debates tienen en común es que se desarrollan dentro del marco ideológico de las economías capitalistas. En otras palabras, asumen que el capitalismo es el sistema económico subyacente que debemos preservar, y que lo que realmente importa son los parámetros tecnológicos bajo los cuales se desarrollará el capitalismo en el futuro. En su mayor parte, se trata de debates muy limitados sobre retoques tecnológicos, que dejan de lado la cuestión más importante de qué regímenes políticos y económicos van a gestionar, supervisar y dirigir estas diversas vías tecnológicas.

La razón por la que las élites plantean las posibles soluciones a nuestros problemas globales comunes como una simple cuestión de retoques tecnológicos es simplemente porque eso es lo que les permitiría conservar su riqueza y poder, preservar el statu quo del que se benefician. Los capitalistas son los depredadores más importantes de las clases dominantes, y los capitalistas de cualquier lugar son maestros del engaño y la distracción. Centrar el debate en el potencial prometeico de la tecnología se ha convertido en un ritual especializado para eludir conversaciones más difíciles sobre la distribución estructural del poder en la sociedad moderna. A estas alturas, es difícil llevar la cuenta de todos los avances tecnológicos que se supone que nos salvarán. Quizás sea la energía eólica y solar. Quizás sea la captura y el almacenamiento de carbono. Quizás sea la gestión de la radiación solar. Quizás sea la fertilización de los océanos. Quizás sean las centrales nucleares de última generación. Quizás sean los superconductores de alta temperatura. Quizás sean las pilas de combustible de hidrógeno. Quizás sea la fusión nuclear. Quizás sean los vehículos eléctricos. Quizás sean los paneles solares en el espacio que envían energía a la Tierra. Quizás sean todas estas cosas. Quizás sea otra cosa. Quizás sea Elon Musk. Quizás sea Papá Noel o Harry Potter. Los personajes de ficción tienen las mismas posibilidades de conseguirlo que todas estas otras cosas. Es imposible abarcar los intrincados matices

³¹ Para un excelente análisis de estas cuestiones, véase Carey King, *The Economic Superorganism* (New York: Springer International, 2020), 59-115.

de todas estas propuestas en un solo capítulo, así que aquí me centraré en dos grandes temas: las tecnologías renovables y la geoingeniería.

Entre quienes han decidido acertadamente que, a la larga, debemos abandonar los combustibles fósiles, al menos para la mayor parte de nuestra producción energética y nuestras actividades económicas, sigue habiendo debates sobre qué debería sustituirlos. Las dos grandes corrientes en este debate son quienes apoyan las energías renovables, como la eólica y la solar, y quienes apoyan la energía nuclear como estrategia de salvación para nuestra civilización. Hay muchos críticos que sostienen que la energía eólica y solar son demasiado poco fiables para satisfacer las demandas energéticas de una red eléctrica moderna.³² Se supone que son fuentes de energía «intermitentes», lo que implica que otras fuentes, como las centrales nucleares y las centrales térmicas de carbón, son más estables. La realidad es muy diferente. Todas las fuentes de energía son intermitentes en diferentes escalas de tiempo. Consideremos el caso de Francia, un país que produce aproximadamente el 70 % de su electricidad a partir de la energía nuclear, una proporción mayor que en cualquier otro país.³³ En 2019, todas las centrales nucleares francesas estuvieron cerradas una media de casi 100 días debido a reparaciones programadas u otras cuestiones de emergencia; esa cifra aumentó a 115 días en 2020, cuando las centrales nucleares francesas generaron menos del 65 % de la electricidad que teóricamente podrían haber producido.³⁴ En 2022, la producción eléctrica de la industria nuclear francesa cayó por debajo del 50 % de su capacidad, alcanzando su nivel más bajo en treinta años.³⁵ La falta crónica de inversión por parte de Électricité de France (EDF), la empresa estatal que gestiona el sistema de energía nuclear, es un factor importante que ha contribuido a los recientes fallos, pero la gran complejidad de la energía nuclear tampoco ayuda. Muchas centrales nucleares francesas sufren corrosión y sellos de soldadura defectuosos. Además, como mencioné en un capítulo anterior, muchas centrales nucleares de todo el mundo dependen en gran medida de ríos fríos para mantener sus reactores bajo control, y el calentamiento global hará que esos ríos se calienten cada vez más con el paso del tiempo, saboteando así la generación de electricidad de gran parte de la industria nuclear. No se trata de un problema hipotético, sino de una cuestión importante que muchos países, entre ellos Francia, ya han experimentado.

Los defensores de la energía nuclear suelen alabar las características avanzadas de la tecnología nuclear, pero esa complejidad tecnológica es, en realidad, una gran razón para no depender de la energía nuclear como sustituto de los combustibles fósiles. Precisamente porque las centrales nucleares son tan complejas de diseñar y construir, se ven afectadas por ridículos sobrecostos, retrasos en la construcción y difíciles problemas operativos y de mantenimiento que duran toda su vida útil. Por ejemplo, EDF construye centrales nucleares en otros países europeos. Construyó una en Finlandia que comenzó a funcionar en 2022, pero que se suponía que estaría lista trece años antes, en 2009. La industria nuclear de Estados Unidos ha sufrido los mismos problemas. La ampliación prevista de la central nuclear VC Summer en Carolina del Sur fue desastrosa después de que su principal contratista quebrara en 2017.³⁶ Desde entonces, la ampliación ha sido descartada, sin nada que mostrar después de haber desperdiciado miles de millones de dólares, y todo el asunto acabó derivando en acusaciones de fraude, demandas, recriminaciones y diversos acuerdos legales. La ampliación de la central de Vogtle, en Georgia, ha experimentado algunos de los mismos problemas. En todo el mundo, la industria nuclear está en ruinas y no consigue recuperarse.

³² Ibid., 96-99.

³³ Liz Alderman, "French Nuclear Power Crisis Frustrates Europe's Push to Quit Russian Energy," New York Times, June 19, 2022.

³⁴ Amory Lovins and M. V. Ramana, "Three Myths About Renewable Energy and the Grid, Debunked," Yale Environment 360 (2021). <https://e360.yale.edu/>.

³⁵ Liz Alderman, "French Nuclear Power Crisis Frustrates Europe's Push to Quit Russian Energy," New York Times, June 19, 2022.

³⁶ King, *The Economic Superorganism*, 93.

En febrero de 2021, cuando una enorme tormenta invernal dejó sin electricidad a todo el estado de Tejas, en los EUA, las fuentes de energía eólica y solar superaron en general a sus homólogos de combustibles fósiles.³⁷ En efecto, la magnitud del desastre se amplificó en gran medida debido a la congelación de los gasoductos de gas natural y a la falta de climatización de las centrales eléctricas que utilizan combustibles fósiles. El índice de duración media de las interrupciones del sistema (IDMIS), un indicador que mide la fiabilidad de la red, también confirma este punto. En 2020, Alemania tuvo un IDMIS de solo 0,25 horas, uno de los más bajos de Europa.³⁸ Por el contrario, Estados Unidos, donde la energía nuclear proporciona el 20 % de la electricidad, tuvo un IDMIS de 1,28 horas en 2020, aproximadamente cinco veces la tasa de interrupción de Alemania. En contraposición a las tonterías que suelen decirse sobre este tema, las fuentes de energía renovables son, en efecto, una fuente de energía muy fiable y pueden utilizarse con éxito para gestionar los problemas de intermitencia cuando las centrales de combustibles fósiles y nucleares no están disponibles. Igualmente importante es que múltiples estudios han demostrado que la adopción generalizada de la energía nuclear daría lugar a unas emisiones de gases de efecto invernadero mucho más elevadas que la adopción generalizada de la energía eólica y solar. Es cierto que la industria nuclear tendría una huella de carbono menor que la actual industria de los combustibles fósiles, pero las incertidumbres que rodean las emisiones futuras derivadas de la expansión de la energía nuclear son enormes.³⁹ Es casi seguro que la difusión de la energía nuclear produciría emisiones de gases de efecto invernadero mucho mayores que la difusión correspondiente de la energía eólica y solar.⁴⁰ Teniendo en cuenta todos estos problemas, es bastante obvio que la energía nuclear no debería ser nuestra estrategia principal de cara al futuro, aunque en casos muy selectos los países deberían seguir construyendo algunas centrales nucleares para complementar la estrategia principal centrada en la expansión de las fuentes de energía renovables.

Sin embargo, los debates más infructuosos son aquellos en los que participan los defensores del actual régimen de combustibles fósiles. Para este grupo, no hay sentido de urgencia ni necesidad de una transición energética para hacer frente a nuestros problemas ecológicos. En cambio, abordarían estos problemas aplicando soluciones de geoingeniería diseñadas para enfriar el planeta y absorber los gases de efecto invernadero de la atmósfera, al tiempo que se seguiría quemando de forma continua combustibles fósiles. La geoingeniería es una intervención antropogénica a gran escala en los sistemas naturales y los flujos de energía de la ecosfera global con el fin de gestionar los efectos nocivos de nuestras actividades económicas. En general, hay dos propuestas generales de geoingeniería sobre la mesa: la gestión de la radiación solar (GRS) y la eliminación de dióxido de carbono (EDC). El objetivo básico de las estrategias de GRS es cambiar de alguna manera la composición química de la atmósfera o la superficie del planeta para que se refleje más luz solar hacia el espacio. Una propuesta destacada es inyectar aerosoles estratosféricos —pequeñas partículas que reflejan la luz solar— en la atmósfera superior. Hay varias señales de alarma importantes asociadas a las estrategias de GRS. Quizás la más grave es que corren el riesgo de desestabilizar gravemente el ciclo hidrológico global, lo que provocaría sequías masivas en todo el mundo.⁴¹ Otro problema importante es lo que se conoce como «choque de terminación», el momento en el que tendremos que dejar de aplicar la GRS. Esto provocará un choque enorme y repentino en las temperaturas globales, ya que, una vez que dejemos de reflejar la luz solar hacia el espacio, volverá a incidir mucha más luz solar sobre la superficie y las temperaturas volverán a subir casi de inmediato. Uno podría preguntarse por qué hay que dejar de aplicar la GRS. ¿Por qué no podemos seguir haciéndolo para siempre? La respuesta está relacionada con el primer punto mencionado anteriormente. Tarde o temprano, seguir aplicando la GRS

³⁷ Ibid.

³⁸ Ibid.

³⁹ Véase Benjamin K. Sovacool, "Valuing the greenhouse gas emissions from nuclear power: A critical survey," *Energy Policy* 36 (2008): 2950-63. Also refer to Ethan Warner and Garvin Heath, "Life Cycle Greenhouse Gas Emissions of Nuclear Electricity Generation," *Journal of Industrial Ecology* 16 (2012): S73-S92.

⁴⁰ Para consultar un estudio exhaustivo reciente sobre el tema, véase Francesco Pomponi and Jim Hart, "The greenhouse gas emissions of nuclear energy," *Applied Energy* 290 (2021): 116743.

⁴¹ John Bellamy Foster, "Making War on the Planet," *Monthly Review* 70 (2018): 1-10.

destruirá prácticamente los ciclos naturales de la biosfera, por lo que no tendremos más remedio que detenerla o reducirla significativamente, lo que inevitablemente producirá un choque de terminación que afectará a la civilización mundial.

A diferencia de la GRS, las estrategias de EDC se centran en eliminar el dióxido de carbono de la atmósfera. Un ejemplo importante de propuesta de EDC es la forestación, que requeriría un esfuerzo global para plantar tantos árboles como sea posible, ampliando así los sumideros naturales de dióxido de carbono. Países como China han tenido un éxito limitado con esta estrategia, pero es dudoso que pueda funcionar con la rapidez suficiente para todo el mundo. Otra idea es la fertilización de los océanos, una estrategia que consiste en añadir nutrientes esenciales en lugares específicos de los océanos de todo el mundo para promover el crecimiento de microorganismos que absorberían aún más dióxido de carbono de la atmósfera. Esta estrategia ha demostrado ser poco fiable, principalmente porque la gran mayoría del carbono absorbido por el océano permanecería cerca de la superficie, por lo que es probable que acabara volviendo a la atmósfera.⁴² Muy poco carbono llegaría a las profundidades del océano, donde podría ser secuestrado de forma natural. Y otro ejemplo más, quizás el más destacado, es la captura y almacenamiento de carbono (CCs), que se refiere al proceso de construir instalaciones especializadas o instalar dispositivos en centrales eléctricas diseñados para eliminar los gases de efecto invernadero de la atmósfera. Las propuestas de EDC constituyen ahora un componente importante de todos los modelos del IPCC sobre los escenarios climáticos futuros. Existe una creencia popular entre los políticos y capitalistas de todo el mundo de que podemos seguir quemando combustibles fósiles sin control, porque siempre podemos extraer ese carbono de la atmósfera más tarde o evitar que llegue allí en primer lugar.

Una de las estrategias de CCs más populares ha sido la captura y almacenamiento de carbono mediante bioenergía (BECCS). Funciona quemando cultivos para generar electricidad y luego capturando el dióxido de carbono resultante y secuestrándolo bajo tierra, de modo que nunca llegue a la atmósfera. En 2023, las instalaciones de BECCS capturaban aproximadamente dos megatoneladas de dióxido de carbono al año, una cantidad insignificante en comparación con las aproximadamente 50 gigatoneladas de gases de efecto invernadero que se emiten anualmente en todo el mundo. Según la Agencia Internacional de la Energía, la eliminación de carbono a través de las instalaciones BECCS alcanzará aproximadamente 40 megatoneladas al año en 2030, lo que es muy inferior a las 250 megatoneladas al año previstas en el propio escenario cero-neto para 2050 de la AIE.⁴³ Más allá del hecho de que la implementación de BECCS lleva un retraso ridículo, vale la pena cuestionarse si esa implementación es una buena idea en primer lugar. La implementación de BECCS a escala mundial podría ser desastrosa para la civilización global, ya que requeriría reservar grandes extensiones de tierra, aproximadamente del tamaño de Australia, para el cultivo y la generación de electricidad.

Se puede concluir con seguridad que las estrategias de CCs no son más que propaganda cuidadosamente orquestada por la industria de los combustibles fósiles, diseñada para prolongar sus beneficios y el orden económico actual del que se benefician.

También sería extremadamente costoso. El climatólogo James Hansen ha estimado que los costes financieros de la implantación de BECCS en este siglo ascenderían a cientos de billones de dólares.⁴⁴ Y dado que BECCS probablemente se implantará en tierras agrícolas con monocultivos dominados por las grandes empresas

agrícolas, es casi seguro que se producirán enormes cantidades de nuevas emisiones de gases de efecto invernadero asociadas a cambios perjudiciales en el uso del suelo. La contrapartida tradicional de BECCS es simplemente CCS, que está diseñado para capturar y almacenar dióxido de carbono en las centrales eléctricas. Adolece de algunos de los

⁴² Ibid.

⁴³ IEA, Bioenergy with Carbon Capture and Storage (Paris: IEA, 2022), <https://www.iea.org/>.

⁴⁴ Foster, "Making War on the Planet," 1-10.

mismos problemas básicos. En cuanto a la implementación de CCS, el académico Vaclav Smil ha llegado a la conclusión de que «para secuestrar solo una quinta parte de las emisiones de CO₂ [de 2010], tendríamos que crear una industria mundial completamente nueva de absorción, recolección, compresión, transporte y almacenamiento, cuyo rendimiento anual tendría que ser aproximadamente un 70 % mayor que el volumen anual que maneja actualmente la industria mundial del petróleo crudo, cuya inmensa infraestructura de pozos, oleoductos, estaciones de compresión y almacenamiento tardó generaciones en construirse».⁴⁵ En general, se puede concluir con seguridad que las estrategias de CCs no son más que propaganda cuidadosamente orquestada por la industria de los combustibles fósiles, diseñada para prolongar sus beneficios y el orden económico actual del que se benefician.

Teniendo en cuenta todos estos retos, una estrategia renovable basada en la «Santísima Trinidad» —eólica, solar e hidráulica— es el camino más plausible y realista para avanzar en el futuro. Que la humanidad lo siga es otra cuestión. Que estas tres fuentes sean los componentes medulares de nuestra estrategia energética futura no significa que no se puedan utilizar otras fuentes de energía. Y si vamos a implementar esta estrategia, entonces debemos considerar cuidadosamente la forma en que decidimos desplegarla y desarrollarla. Dado que se necesita energía para producir más energía, la ampliación de nuevas coronas basadas en fuentes de energía renovables también podría terminar consumiendo una gran cantidad de energía, a menos que la transición a las energías renovables se gestione y controle adecuadamente a través de un proceso político y económico arraigado en las realidades de la biosfera planetaria. Por ejemplo, la transición a las energías renovables requerirá el uso de más tierra, la construcción de grandes parques solares y eólicos mediante maquinaria compleja, la extracción y producción de nuevos minerales y elementos, y la expansión de las redes de transporte a través del comercio mundial. Estos cambios deberán equilibrarse con efectos de reducción de escala en otros sectores económicos, ya que, en ausencia de restricciones estratégicas por parte del poder estatal, esta espiral viciosa de energía y tecnología no haría más que agravar aún más los problemas actuales de nuestra civilización. Una posible restricción compensatoria es aplicar una gran reducción de la producción mundial de carne

Se puede y tiene que llevarse a cabo una transición radical y rápida hacia las energías renovables, pero solo si va acompañada de recortes masivos en el consumo total de energía.

de vacuno, que requiere enormes extensiones de tierra para el cultivo de los piensos que se utilizan para alimentar al ganado. Este es solo un posible cambio; la cuestión más importante es que hay muchas dimensiones complejas en la dinámica del uso de la tierra que la humanidad tendría que considerar al llevar a

cabo una transición energética que la aleje de la adicción a los combustibles fósiles del capitalismo moderno. Se puede y tiene que llevarse a cabo una transición radical y rápida hacia las energías renovables, pero solo si va acompañada de recortes masivos en el consumo total de energía mediante el desmantelamiento de más centrales térmicas de carbón y gas y la imposición política de nuevos límites al sector del transporte, junto con otras formas de política industrial, para gestionar y garantizar la estabilidad de los precios de mercado y otros indicadores financieros.

Por poner otro ejemplo, las presas hidroeléctricas que operan en climas cálidos y a baja altitud emiten grandes cantidades de gases de efecto invernadero, especialmente metano, debido en gran parte a la materia orgánica en descomposición confinada en los embalses. Algunas instalaciones hidroeléctricas producen más emisiones de gases de efecto invernadero que las centrales eléctricas de carbón. Si queremos ampliar la capacidad de energía renovable mediante la construcción de nuevas instalaciones hidroeléctricas, deberíamos centrarnos en construir las en climas más fríos y a mayor altitud, donde es probable que los embalses contengan menos materia orgánica susceptible de descomponerse y liberar gases nocivos como el metano. Por eso las centrales hidroeléctricas de Noruega, que producen aproximadamente el 90 % de la electricidad del país, tienen unas emisiones de gases de efecto invernadero durante su

⁴⁵ Vaclav Smil, "Global Energy: The Latest Infatuations" American Scientist 99 (2011).

ciclo de vida extremadamente bajas, comparables a las de los parques solares y eólicos típicos.⁴⁶ Tiene sentido construir capacidad hidroeléctrica en lugares como Noruega, Rusia y Canadá. Pero desde la perspectiva de una biosfera estable, es mucho más difícil hacerlo en lugares como Brasil, que lleva mucho tiempo barajando la idea de construir presas a lo largo del Amazonas. Eso no quiere decir que sea imposible. Pero si se quiere hacer de una manera ecológicamente beneficiosa, es necesario planificarlo con mucho más cuidado de lo que se ha hecho hasta ahora. También es importante recordar, a medida que desmantelamos las centrales de combustibles fósiles en el futuro, que estas tienen algunas ventajas sobre la energía eólica y solar, como la flexibilidad y la gestión de la demanda. Si hay demasiada electricidad en la red, simplemente podemos apagar una central de carbón y esta no producirá nada. Incluso con mejoras significativas en las tecnologías de almacenamiento de energía, es más difícil generar el mismo nivel de flexibilidad con turbinas eólicas y paneles solares. Afortunadamente, la energía hidroeléctrica ofrece precisamente ese nivel de flexibilidad máxima, ya que cualquier central hidroeléctrica puede encenderse y apagarse según sea necesario. Es más, el almacenamiento hidroeléctrico por bombeo es uno de los métodos de almacenamiento de energía mejor establecidos y se está extendiendo rápidamente por todo el mundo.⁴⁷ Funciona bombeando agua de un embalse a otro situado a mayor altura y almacenándola allí hasta que se necesita más tarde. En ese momento, el agua se libera de nuevo al embalse inferior, impulsando una turbina que produce electricidad en el proceso. Lo mejor es que el almacenamiento por bombeo ni siquiera necesita ríos o lagos naturales para funcionar. Cualquier lugar que pueda almacenar agua es válido.

La otra consideración importante es que, aunque necesitamos reducir rápidamente la industria de los combustibles fósiles, no es buena idea eliminarla de inmediato. Una de las razones es que la contaminación generada por la quema de combustibles fósiles da lugar a capas de partículas en la atmósfera que impiden que parte de la radiación solar llegue a la superficie del planeta. Ese proceso tiene un efecto de enfriamiento sobre las temperaturas globales.⁴⁸ Si mañana cerráramos todas las refinerías y centrales eléctricas de combustibles fósiles, las temperaturas globales se acelerarían rápidamente al alza durante un breve periodo de tiempo, lo que provocaría el caos en el sistema económico mundial. Otra limitación importante para la eliminación inmediata de los combustibles fósiles es el transporte. Aunque las

La generación de electricidad puede experimentar una transición radicalmente rápida hacia las energías renovables; no existe ninguna barrera tecnológica en este sentido. El problema son únicamente las barreras sociales y políticas.

baterías eléctricas para el transporte terrestre han avanzado enormemente hasta ahora, no disponemos de equivalentes comercialmente viables para el transporte aéreo o el transporte marítimo mercante. La empresa china CATL, el principal fabricante mundial de baterías para vehículos eléctricos, anunció a principios de 2023 que comenzaría a realizar la manufactura en masa de una batería de última generación con una densidad energética que podría

alcanzar hasta 500 vatios-hora por kilogramo, aproximadamente el doble de la densidad energética de las mejores baterías del mercado.⁴⁹ CATL también afirmó que esta batería podría utilizarse en aviones de pasajeros. Pero, incluso si fuera así, podrían pasar años antes de que la tecnología se considerara lo suficientemente fiable como para su adopción generalizada en el sector aéreo. Y por eso es tan importante la espectralización selectiva: necesitamos diferentes estrategias de gestión social para diferentes sectores. La generación de electricidad puede experimentar una transición radicalmente rápida hacia las energías renovables; no existe ninguna barrera tecnológica en este sentido. El problema

⁴⁶ Mafalda Silva and Ingunn Saur Modahl, "The inventory and life cycle data for Norwegian hydroelectricity," Norwegian Institute for Sustainability Research, 2019, <https://norsus.no/>.

⁴⁷ Mira Rojanasakul and Max Bearak, "Is It a Lake, or a Battery? A New Kind of Hydropower Is Spreading Fast," New York Times, May 2, 2023.

⁴⁸ Véase Rachel DuRose, "The terrible paradox of air pollution and climate change," Vox, September 17, 2023. <https://www.vox.com/>.

⁴⁹ "Dan Gearino, "A New Battery Intended to Power Passenger Airplanes and EVs, Explained," Inside Climate News, May 18, 2023, <https://insideclimatenews.org/>."

son únicamente las barreras sociales y políticas. Pero debemos tener cuidado con el transporte, porque en efecto las barreras tecnológicas son más graves.

En contraste con la espectralización catalítica del capitalismo tardío, necesitamos una espectralización estratégica, equilibrada y específica que aproveche la innovación en industrias críticas, pero que gestione cuidadosamente el cambio tecnológico en otras. Bajo el régimen capitalista, es fácil que los efectos de red y de mercado se intensifiquen

Necesitamos nuevas instituciones políticas y económicas que den prioridad a la estabilidad a largo plazo de nuestra biosfera, así como a las preocupaciones económicas de los trabajadores de todo el mundo.

rápidamente, lo que eleva el consumo de energía a niveles extremadamente altos y, por lo tanto, disipa más energía a nuestros entornos externos. Si queremos centrar la innovación tecnológica en unas pocas industrias, esto debe equilibrarse con restricciones compensatorias en otras industrias. Lograr esa espectralización específica no es posible en el contexto de las relaciones de poder

existentes en el capitalismo tardío. Necesitamos nuevas instituciones políticas y económicas que den prioridad a la estabilidad a largo plazo de nuestra biosfera, así como a las preocupaciones económicas de los trabajadores de todo el mundo. Y para llegar a ello, tendremos que comprender mejor la compleja relación entre la sociedad, la energía y la tecnología, es decir, comprender cómo las acciones de las instituciones sociales que gobiernan nuestras vidas afectan a la dinámica energética y tecnológica que cada vez más gobierna la ecosfera global.

Vínculos relacionados:

- La Alianza Global Jus Semper
- Monthly Review
- Erald Kolasi: [El Estado Ecológico](#)
- Erald Kolasi: [La Física del Capitalismo](#)
- Erald Kolasi: [Energía, Crecimiento Económico y Crisis Ecológica](#)
- John Bellamy Foster: [La Larga Revolución Ecológica](#)
- John Bellamy Foster: [Marxismo y Ecología](#)
- John Bellamy Foster y Brett Clark: [La Expropiación de la Naturaleza](#)
- Álvaro J. de Regil Castilla: [Geocracia, el paradigma que va en pos del bienestar de la gente y el planeta y no del mercado](#)
- Álvaro J. de Regil Castilla: [La Insoportable Falta de Conciencia de Nuestra Crisis Ecológica Existencial](#)

❖ **Acerca de Jus Semper:** La Alianza Global Jus Semper aspira a contribuir a alcanzar un ethos sostenible de justicia social en el mundo, donde todas las comunidades vivan en ámbitos verdaderamente democráticos que brinden el pleno disfrute de los derechos humanos y de normas de vida sostenibles conforme a la dignidad humana. Para ello, coadyuva a la liberalización de las instituciones democráticas de la sociedad que han sido secuestradas por los dueños del mercado. Con ese propósito, se dedica a la investigación y análisis para provocar la toma de conciencia y el pensamiento crítico que generen las ideas para la visión transformadora que dé forma al paradigma verdaderamente democrático y sostenible de la Gente y el Planeta y NO del mercado.

❖ **Acerca del autor: Erald Kolasi** Es escritor e investigador independiente especializado en la relación entre la energía, la tecnología, la economía, los sistemas complejos y la dinámica ecológica. Su primer libro, *The Physics of Capitalism*, fue publicado por [Monthly Review Press](#) en febrero de 2025. Obtuvo su doctorado en Física por la Universidad George Mason en 2016.



❖ **Acerca de este trabajo:** Este texto es una reedición del capítulo 7 del libro del autor, «[The Physics of Capitalism](#)» (La física del capitalismo). Se ha reeditado con el permiso especial del autor, por lo que le estamos muy agradecidos. Este artículo se ha publicado bajo licencia Creative Commons, CC-BY-NC-ND 4.0. Se permite la reproducción del material para uso no comercial, siempre que se cite al autor y se incluya un enlace al editor original.

❖ **Cite este trabajo como:** Erald Kolasi: Las Dinámicas Tecnológicas del Crecimiento y la Estabilidad – La Alianza Global Jus Semper, abril de 2026.

❖ **Etiquetas:** Democracia, Capitalismo, Economía, Marx, Ecología, Ecodinámica, Espectralización, Física, Consumo energético, Eficiencia tecnológica.

❖ La responsabilidad por las opiniones expresadas en los trabajos firmados descansa exclusivamente en su(s) autor(es), y su publicación no representa un respaldo por parte de La Alianza Global Jus Semper a dichas opiniones.



Bajo licencia de Creative Commons Reconocimiento 4.0 Internacional.
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.es>

© 2026. La Alianza Global Jus Semper
Portal en red: https://www.jussempere.org/Inicio/Index_castellano.html