

La transformación de la energía limpia: un nuevo paradigma para el progreso social dentro de los límites planetarios

Nafeez Ahmed

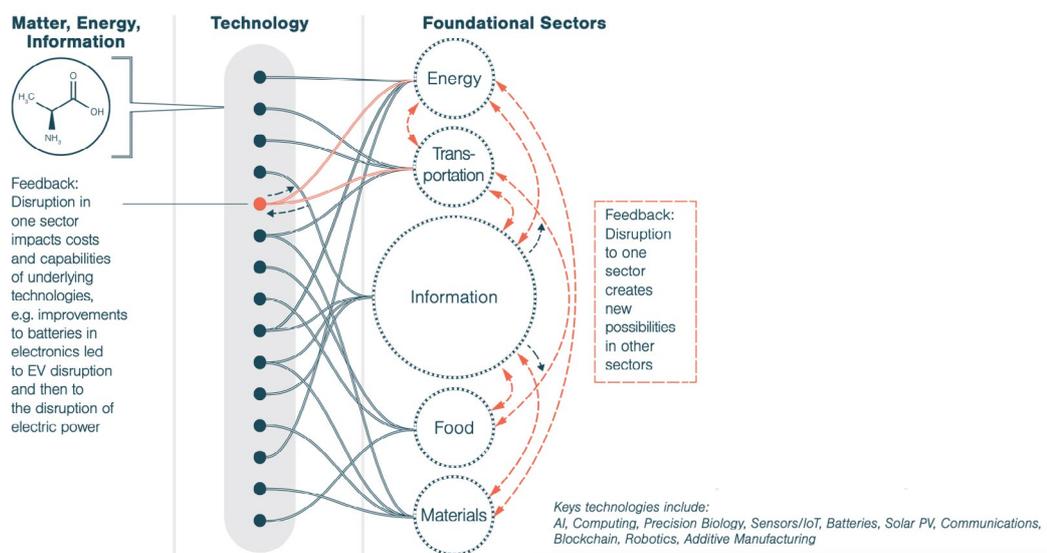
Director de Comunicaciones de Investigación Global en RethinkX e investigador del Instituto Schumacher para Sistemas Sostenibles

El mundo se encuentra en la cúspide de la transformación más profunda y rápida del sistema energético mundial de la historia. La desaparición de la era de los combustibles fósiles es imparable, pero si la civilización humana sobrevivirá al peligroso cambio climático sigue siendo una pregunta abierta, y depende de las decisiones sociales que tomemos hoy. Las elecciones correctas podrían abrir un espacio de posibilidades sin precedentes que permita una nueva era de abundancia de energía limpia. Esas nuevas posibilidades podrían empoderar a la humanidad para resolver algunos de sus problemas más difíciles: la escasez y la volatilidad de la energía, la persistencia de la inseguridad alimentaria y la desnutrición, la pobreza mundial y las crecientes desigualdades.

Sin embargo, reconocer y crear este nuevo espacio de posibilidades requiere un completo análisis de sistemas que reconozca cómo el sistema energético está interconectado con otros sectores clave de la economía. Un enfoque de sistemas holísticos nos permite ver no solo las tremendas oportunidades de estas disrupciones, sino también comprender mejor los riesgos que implica retrasarlas mediante la protección de las industrias establecidas más problemáticas.

La transformación disruptiva de la civilización

Las metodologías convencionales abordan tecnologías y sectores de forma aislada, en lugar de reconocer que funcionan como sistemas interconectados. Pero la disrupción de la energía no está ocurriendo de forma aislada. Está íntimamente relacionada con las disrupciones en



los sectores de la información, el transporte, los materiales y los alimentos, y comprender la dinámica de cada una de estas disrupciones requiere reconocer sus conexiones. La mayoría de

las instituciones principales no logran comprender el nexo crucial entre la disrupción, el cambio social y la transformación del sistema.

Figura 1. Tecnologías Clave, Convergencia e Interacción entre Sectores.
Fuente: Rethinking Climate Change (2021)

Uno de los mayores obstáculos para comprender las oportunidades de las disrupciones actuales en los sectores de la energía, el transporte y los alimentos es no ver cómo traerán dinámicas de sistema completamente nuevas que dejarán obsoletas las reglas del antiguo sistema actual.

Hoy en día, una serie de disrupciones tecnológicas superpuestas e interconectadas en cada uno de los cinco sectores fundamentales que definen la civilización está trastornando las industrias establecidas.

La forma aislada de ver el mundo de las instituciones de gobernanza convencionales les impide anticipar cómo las disrupciones en cada sector representan cambios de fase con efectos en cascada en todos los sectores. Estos no solo se acelerarán entre sí, sino que transformarán las disrupciones mismas. Uno de los mayores obstáculos para comprender las oportunidades de las disrupciones actuales en los sectores de la energía, el transporte y los alimentos es no ver cómo traerán dinámicas de sistema completamente nuevas que dejarán obsoletas las reglas del antiguo sistema actual.

Cuando examinamos el papel de las disrupciones tecnológicas en los brotes de crecimiento de las civilizaciones (tanto del pasado como del presente), lo que vemos es que las disrupciones no son sustituciones uno por uno donde una tecnología simplemente desplaza a otra.

En cambio, implican cambios de fase completos en la forma en que opera esa parte del sistema de producción. A veces caen en cascada a través de otros sectores. De hecho, algunas disrupciones tecnológicas del sector productivo son tan fundamentales que implican transformaciones totales de la estructura de la actividad económica.

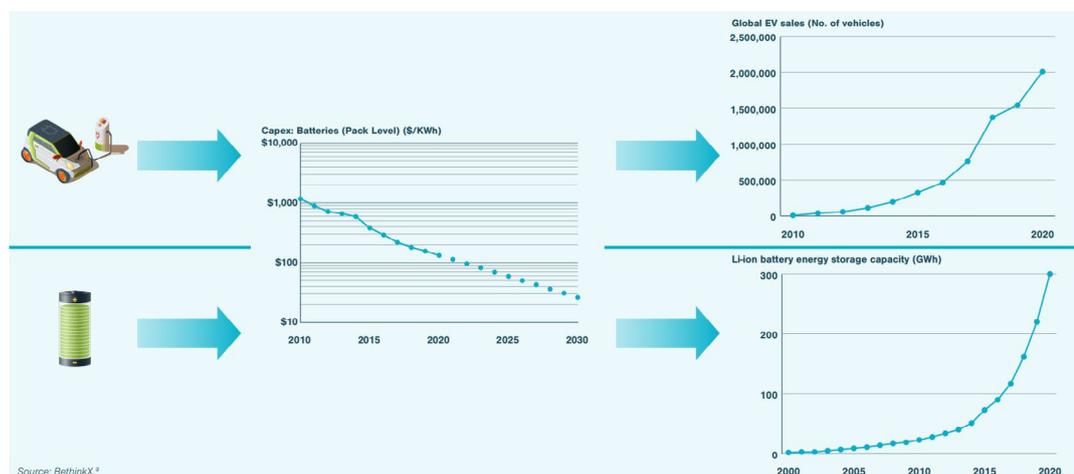
Por ejemplo, como muestran [Arbib y Seba en Rethinking Humanity](#): Cinco disrupciones fundamentales del sector, el ciclo de vida de las civilizaciones y la era venidera de la libertad, la invención de la imprenta en el siglo XV –una disrupción de la información– no fue una forma cada vez mejor de escribir manualmente en manuscritos hechos con pieles de animales. La capacidad de imprimir rápidamente grandes volúmenes de texto en papel a costos 10 veces más baratos no solo provocó el colapso de las industrias de manuscritos sino que abrió el camino para una transformación fundamental en la propiedad, producción y distribución de la información. La disrupción rompió el dominio cultural de la Iglesia en Europa y, combinada con otras transformaciones sociales y políticas, allanó el camino para la Ilustración y la Revolución Científica. Esta disrupción en el sector de la información tuvo implicaciones transformadoras para estructuras económicas más amplias. Revirtió el monopolio medieval de la Iglesia sobre la información y dispersó la producción y distribución de información entre una clase mercantil emergente, socavando la propiedad feudal.

De manera similar, el automóvil no fue solo un caballo más rápido, fue un cambio de fase en el sistema de transporte que condujo a transformaciones fundamentales en todo: el diseño de las ciudades, cómo producíamos y distribuíamos alimentos y ropa, y cómo luchábamos en las guerras. También creó consecuencias negativas en forma de contaminación por carbono.

En otras palabras, las disrupciones tecnológicas a nivel del sector productivo cambian las reglas que definen todo un sistema de producción a nivel sectorial. Dependiendo de cómo se desarrollan, pueden generar e impulsar cambios en otros sectores y sociedades enteras.

Lo más importante es que no se trata de cambios lentos e incrementales. Las disrupciones ocurren rápidamente, impulsadas por mejoras de rendimiento exponenciales y reducciones de costos que permiten que las nuevas tecnologías superan a las tradicionales.

Más recientemente, por ejemplo, el impacto del surgimiento de Internet y los teléfonos inteligentes en el sector de la información ha repercutido en otros sectores y ha alterado los modelos centralizados tradicionales de los medios de comunicación. En Repensar la humanidad, [Arbib y Seba explican](#) cómo la llegada de los teléfonos inteligentes no solo alteró el mercado de las telecomunicaciones, sino también el comercio minorista, la alimentación y el transporte. Los nuevos modelos de negocio de la información han permitido la introducción de servicios de transporte compartido y entrega de alimentos, lo que ha perturbado los negocios de taxis y restaurantes. Ha habido mejoras rápidas en las baterías de iones de litio que, a su



vez, han hecho que los vehículos eléctricos (VEs) sean mucho más asequibles y competitivos. Por lo tanto, la disrupción en el sector de la información ha jugado un papel crucial en la disrupción de la industria petrolera mundial y la reducción de la demanda de energía convencional.

Además, a medida que los costos de los vehículos eléctricos se desploman, están en camino de hacer que los viajes compartidos sean aún más baratos que la propiedad privada de vehículos con motor de combustión interna (MCI). La tecnología de conducción autónoma está mejorando tanto gracias a la tecnología de la información que pronto hará realidad los coches autónomos. La combinación interrumpirá la propiedad privada de los autos con MCI, ya que el transporte como servicio (TcS) se vuelve 10 veces más barato.

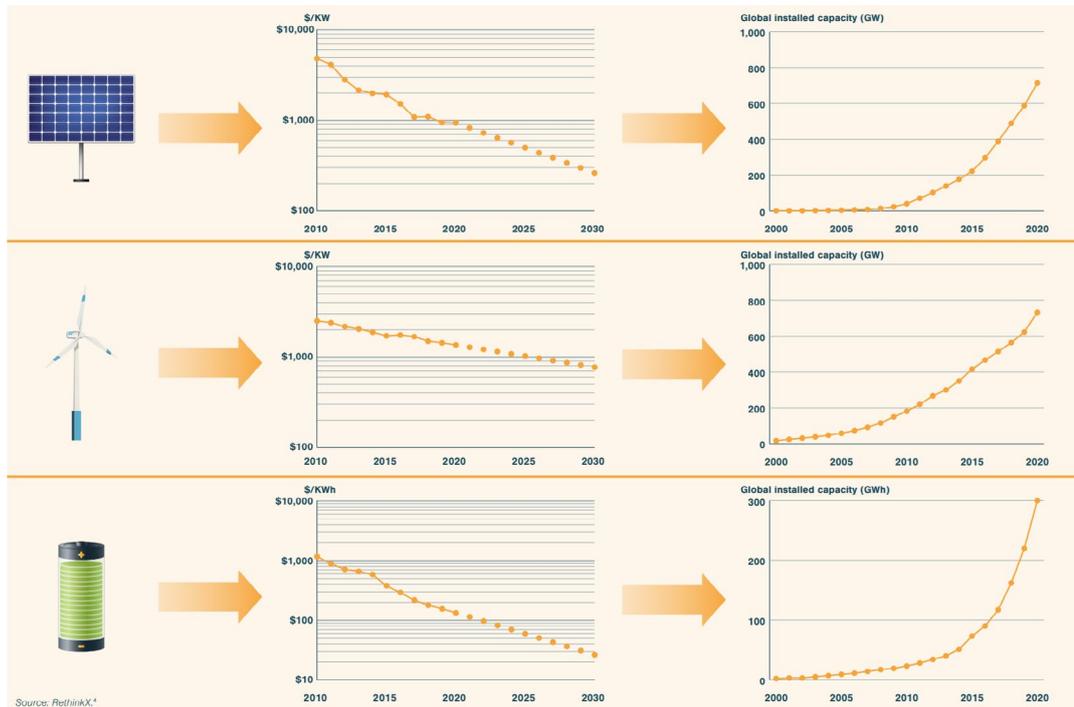


Figura 2. La disrupción del sector del transporte, cómo se ejemplifica a través de la disminución exponencial de costos y las tasas de adopción exponenciales.

Los costos de las baterías están cayendo, con un gran impacto en el sector energético, que está experimentando una disrupción más amplia debido a la combinación de energía solar, eólica y baterías. Estas tecnologías están mejorando para convertir la luz solar y el viento en electricidad y almacenarla. Sus costos decrecientes los están convirtiendo en las formas de electricidad más baratas en la mayoría de las regiones del mundo: también están en camino de volverse hasta 10 veces más baratos en las próximas dos décadas.

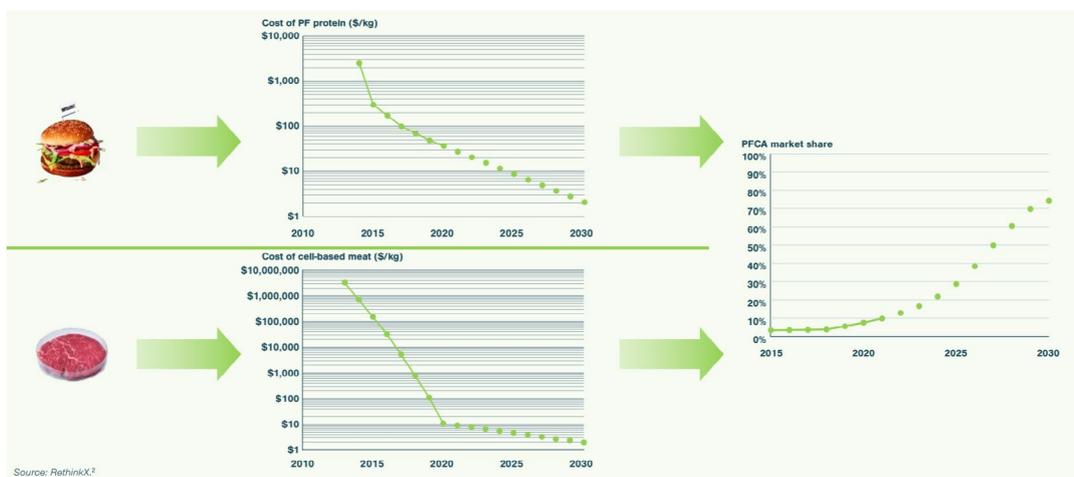


Figure 3. La disrupción del sector energético ejemplificada a través de disminuciones de costos y tasas de adopción, ambos exponenciales.

El impacto de la disrupción de la información en los materiales ha impulsado el aumento de la impresión 3D, la nanotecnología y la biología de precisión. Eso ahora está afectando al sector

alimentario, donde los avances de la información ahora nos permiten manipular la materia a escalas cada vez más pequeñas y elaborar y programar proteínas de la forma que queramos. Los costos de la fermentación de precisión (FP) y la agricultura celular (AC), que nos permitirán crear productos de carne animal real sin matar animales, están cayendo tan rápido que la FP está en camino de volverse 10 veces más barata que la industria ganadera dentro de aproximadamente 10 -15 años. La tecnología comenzará a interrumpir la agricultura industrial para productos como la [soya y el aceite de palma](#).

**Las disrupciones
previenen la continuación
de los negocios habituales
dentro del paradigma
industrial actual.**

Figura 4. La disrupción del sector alimentario, ejemplificada a través de la disminución exponencial de los costos y el comienzo de una tasa de adopción exponencial.

La historia de las disrupciones tecnológicas revela que cuando las tecnologías emergentes se vuelven 10 veces más baratas que las tradicionales, eliminan a las tradicionales, que ya no pueden competir. La adopción de las nuevas tecnologías, que al principio comienza lentamente, se acelera exponencialmente a lo largo de una curva en S, desacelerándose a medida que alcanza la adopción masiva. Esto no sucede de una manera prolongada, lineal o incremental. Ocurre rápidamente, a menudo en tan sólo de 10 a 15 años.

Las disrupciones previenen la continuación de los negocios habituales dentro del paradigma industrial actual. Por lo contrario: están reemplazando ese paradigma y afectando a todos los sectores fundacionales definitorios de la civilización industrial. Las nuevas tecnologías [superarán](#) a las tecnologías industriales convencionales de energía, alimentos y transporte, intensivas en carbono, que resultan ser responsables del 90% de las emisiones de carbono, en las próximas dos décadas.

Como estas disrupciones abarcan todos los sectores de producción fundamentales de la civilización, todo el sistema de producción de la civilización está en la cúspide de la transformación.

Interconexión de disrupciones y la próxima contracción material.

No podemos esperar entender la transición energética en un silo, sino solo como parte integral de un proceso más amplio de transformación disruptiva en los cinco sectores fundamentales que definen la civilización.

Como se describe en nuestro informe [Repensar el cambio climático](#), el impacto combinado de las disrupciones en la energía, el transporte y los alimentos significa que toda la infraestructura de los paradigmas existentes de energía, transporte y alimentos basados en combustibles

Aunque la energía limpia requiere un aumento en la producción de minerales específicos durante las próximas dos décadas, aún ofrece una reducción drástica en la huella material total del sistema energético global.

fósiles se volverá obsoleta. Con la caída de la demanda de petróleo, gas y carbón, la enorme infraestructura global de logística y transporte que opera hoy en día para transportar grandes cantidades de petróleo, gas y carbón en todo el mundo ya no será necesaria. Tampoco lo hará la vasta infraestructura de plataformas petrolíferas, centrales eléctricas de carbón u oleoductos; tampoco lo harán las complejas redes de envío para transportar ganado y productos pecuarios a través de grandes distancias, ya que se verán interrumpidas por los centros de producción locales de FP y AC.

Por lo tanto, grandes cantidades de vehículos dedicados al transporte pesado por tierra, aire y mar se volverán innecesarios. Al interrumpir la propiedad privada de automóviles, la transformación de VEs y VEs autónomos y el aumento de TcS significará que solo una fracción de la cantidad de automóviles de hoy estará en la carretera. En lugar de que todos tengan su propio automóvil, la mayoría de las millas recorridas serán transportadas por TcS, con una flota mucho más pequeña de vehículos en servicio. En lugar de reemplazar los vehículos de gasolina como una sustitución uno por uno, los vehículos

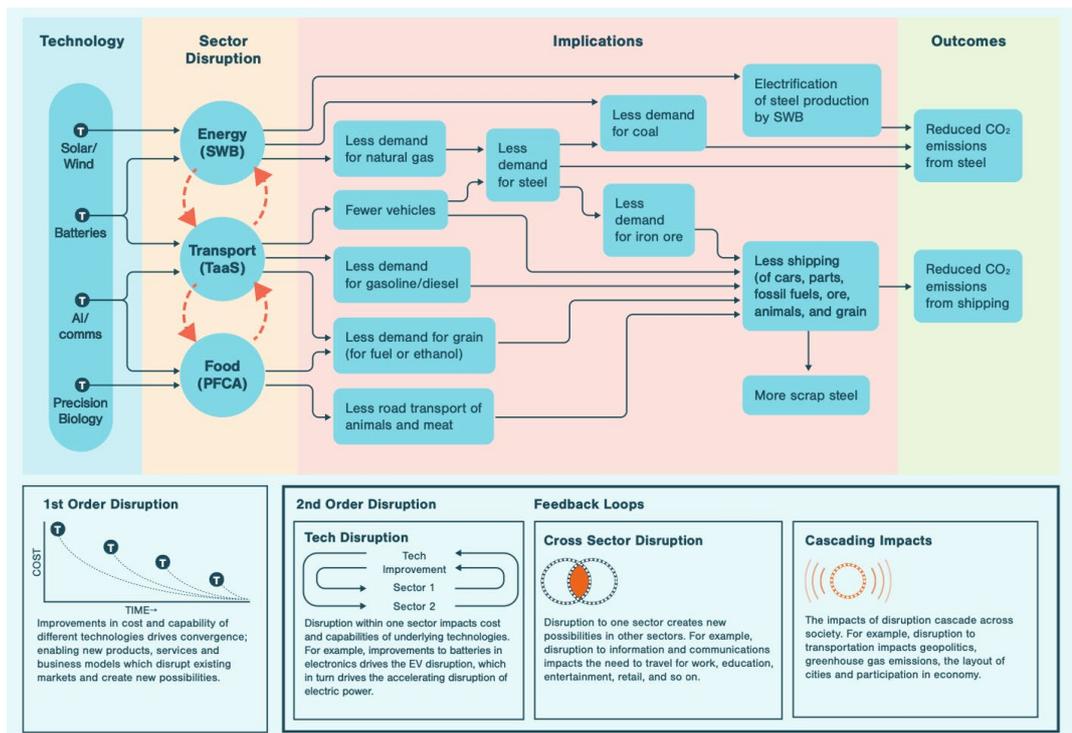
eléctricos nos permitirán usar una fracción de la cantidad de vehículos que usamos ahora. Los modelos que predicen la escasez de materias primas basándose en una sustitución uno por uno de los vehículos de gasolina por vehículos eléctricos están equivocados.

Ya no será necesario mantener la antigua infraestructura industrial de combustibles fósiles con sus enormes insumos de minerales y metales en bruto. Un [análisis realizado por Carbon Tracker](#) comparó los insumos materiales para el sistema de combustibles fósiles y el sistema de energía limpia. La generación de carbón necesita 2,000 veces más material por peso que la electricidad solar. El sistema de combustibles fósiles requiere más de 300 veces más materiales por peso que un sistema de energía limpia. Esto significa que, aunque la energía limpia requiere un aumento en la producción de minerales específicos durante las próximas dos décadas, aún ofrece una reducción drástica en la huella material total del sistema energético global. La producción de materiales disminuirá drásticamente después de 2040 porque una vez que se construya el sistema de energía limpia, tendrá una vida útil de al menos 50 a 80 años, si no más.

Por el contrario, la enorme infraestructura del sistema de energía de combustibles fósiles, así como la del MCI, creará un vasto depósito mundial de metales como el acero, el cobre, el aluminio, el níquel y el cobalto disponibles para reciclar en energía limpia, transporte y la industria de alimentos. Los estudios que advierten sobre los cuellos de botella inminentes de las materias primas debido al despliegue de la infraestructura de energía limpia no tienen en cuenta este efecto secundario de la obsolescencia de las industrias establecidas. Por lo tanto, podremos satisfacer la creciente demanda de muchos metales y materiales de las disrupciones limpias mediante una combinación de nueva minería y reciclaje en un orden de magnitud mucho mayor

que el que reconocen los modelos convencionales.

Hasta el momento, ningún estudio ha modelado estos efectos en cascada de las interrupciones de la energía, el transporte y los alimentos en relación con los minerales y el reciclaje. Sin embargo, algunas investigaciones ofrecen información más precisa.



La primera evaluación importante del ciclo de vida global de un sistema potencial de energía renovable, publicada en [Proceedings of the National Academy of Sciences](#) (PNAS) en 2015, corrobora el análisis que se establece aquí. Sin embargo, no apreció por completo ni tuvo en cuenta la dinámica novedosa del nuevo sistema de energía limpia, ya que se centró sólo en el sector energético. Sin embargo, la evaluación de PNAS, dirigida por la Universidad Noruega de Ciencia y Tecnología, encontró que el impacto ambiental de la extracción de materias primas para tecnologías de energía limpia disminuiría con el tiempo, por lo que la cantidad total de esos materiales sería una fracción del volumen de materiales que está siendo minado hoy.

En el escenario PNAS, la energía solar, eólica e hidroeléctrica constituiría el 39% de la producción total de energía mundial. Pero debido a que la generación de energía eólica y solar **no requiere insumos adicionales de materias primas durante su vida útil** (a diferencia de las plantas de energía convencionales, que requieren extracción y refinamiento adicionales continuos de petróleo, gas y carbón), la energía renovable en general requiere muchas menos materias primas. Otros modelos han descuidado ese matiz crucial.

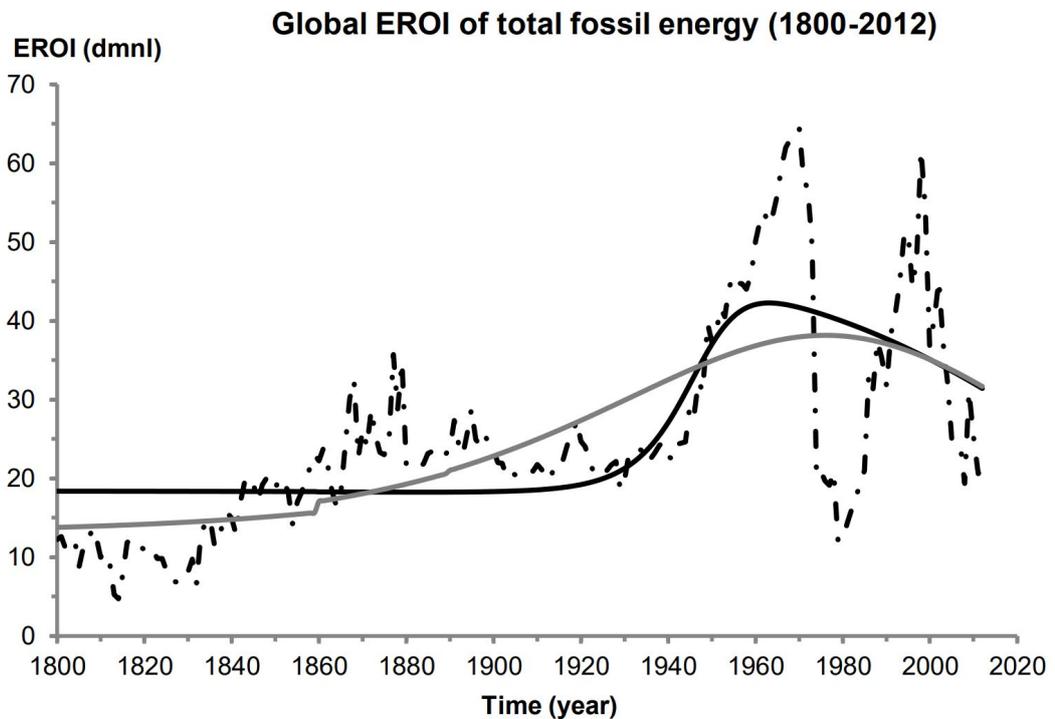
En el escenario PNAS, las nuevas instalaciones de energía limpia aumentarían la demanda de hierro y acero en solo un 10 %, con el cobre requerido para los paneles solares equivalente a dos años de la producción mundial actual de cobre. Cuando sea necesario reemplazar las instalaciones solares o eólicas, las materias primas para hacerlo estarían disponibles

reciclando generadores de energía más antiguos. Se señalarían otros beneficios: la contaminación del agua dulce se reduciría a la mitad y la contaminación del aire disminuiría en un 40%. Los beneficios para la salud humana por sí solos de una disminución de la contaminación del aire serían enormes.

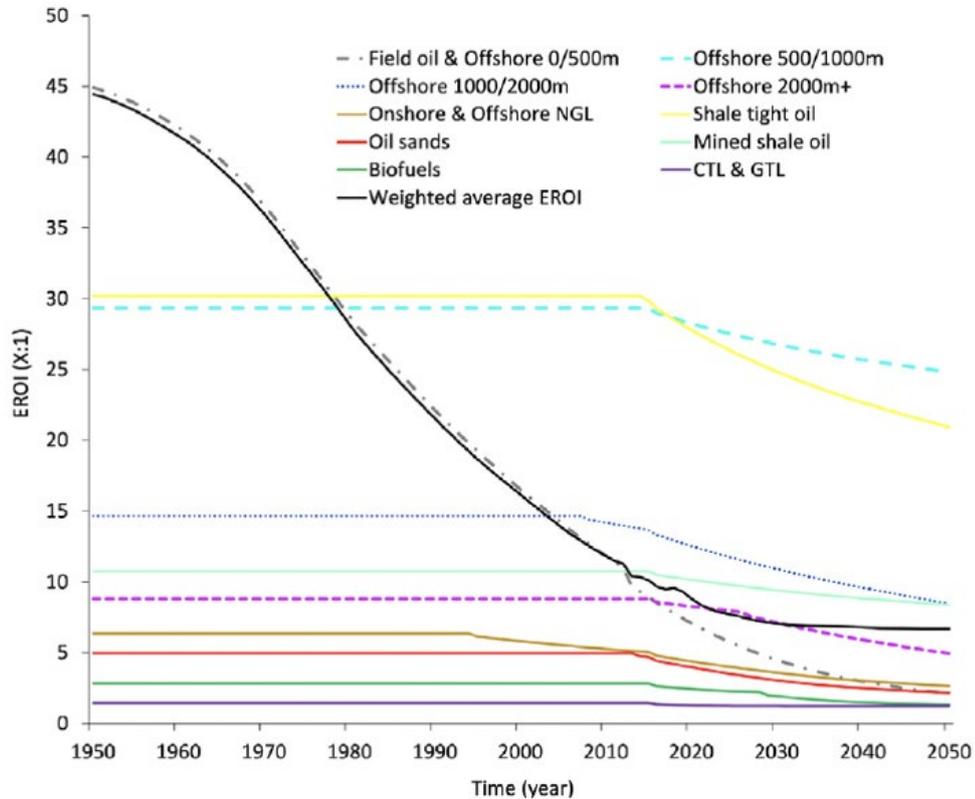
Hay brechas significativas en este modelo, ya que no incorpora el amplio alcance para el reciclaje de metales de la infraestructura de combustibles fósiles en un escenario de energía limpia 100% global. Sin embargo, si sus hallazgos se extrapolaran a un sistema global de este tipo, gran parte del exceso de producción de hierro, aluminio y cobre requerido podría adquirirse a partir del reciclaje de esa infraestructura obsoleta.

Figura 5. Efectos en cascada de las interrupciones en el hierro y el acero. Fuente: Rethinking Climate Change (2021)

En 2014, el Fondo Mundial para la Naturaleza encargó a Ecofys, la principal consultora energética holandesa, que explorara los riesgos de suministro de materiales críticos. Su informe, *Critical Materials for the Transition to a 100% Sustainable Energy Future*, encontró que los minerales como el indio, el galio y el telurio utilizados para los paneles solares no supondrían cuellos de botella debido a la fácil sustitución con otros materiales abundantes como el silicio. En cuanto a los elementos de tierras raras neodimio e itrio, que se utilizan en las turbinas eólicas, se prevé que su oferta supere la demanda. Y aunque el informe dijo que los suministros de litio y cobalto podrían plantear desafíos, estos pueden resolverse mediante el



reciclaje, la sustitución del litio en otros sectores y la sustitución del cobalto en los cátodos. El níquel y el cobalto no se utilizan en las baterías de fosfato de hierro y litio, por ejemplo.



Las tasas actuales de reciclaje de metales críticos están por debajo del 1 % y algunos elementos de tierras raras no se reciclan en absoluto. Esto significa que el potencial de reciclaje es enorme. [Según un estudio de 2021](#) realizado por el Instituto de Futuros Sostenibles de la Universidad Tecnológica de Sydney, la evaluación de la Agencia Internacional de Energía (AIE) sobre cómo el reciclaje de materiales críticos podría aliviar la demanda de nueva minería es demasiado conservadora. El estudio de Sydney encuentra que la demanda de níquel, cobalto, litio y cobre en bruto para las baterías de VEs podría reducirse hasta en un 55 % mediante un mayor reciclaje. Un estudio de 2022 [encargado por Eurometaux](#), la asociación europea de productores de metales encuentra que para 2050, hasta el 75 % de las necesidades de energía limpia en metal de Europa se pueden satisfacer a través del reciclaje local a partir de alrededor de 2040.

Por lo tanto, no hay pruebas serias de que la disrupción de la energía limpia se enfrente a obstáculos insuperables de cuellos de botella de minerales o materias primas, si buscamos prácticas óptimas de economía circular.

Energía neta

El concepto de retorno de la inversión en energía (RIE) es una métrica importante para comprender la eficiencia de un sistema energético. Es una simple relación de la energía obtenida de una fuente dada dividida por la energía que se necesita para extraerla. El desafío de producir evaluaciones precisas de la RIE de cualquier recurso es garantizar las suposiciones correctas sobre ese recurso, incluido exactamente cómo y dónde se miden las entradas y salidas de energía para obtener las cifras más precisas.

El RIE es una medida importante porque puede proporcionar información útil sobre la cantidad de energía neta disponible para la sociedad. Cuanto mayor sea la relación, más excedente de energía neta estará disponible para apoyar otras actividades sociales y económicas. Cuanto menor sea la relación, menos energía disponible. Una disminución en el RIE implica un declive económico.

En la actualidad existe un cuerpo convincente de [literatura científica](#) que muestra que el RIE del sistema energético mundial de combustibles fósiles ha estado en declive durante varias décadas y está experimentando un círculo vicioso de rendimientos decrecientes del cual no hay perspectivas de recuperación.

Figura 6. Fuente: Court and Fizaine, Ecological Economics (2017)

Figura 7. Fuente: Delannoy, Longaretti, Prados and Murphy, *Applied Energy* (2022)

Sin embargo, a menudo se argumenta que si bien la disminución del RIE es inevitable con los combustibles fósiles, la energía renovable representa [una disminución adicional en el RIE](#) que significa que no pueden lograr los mismos niveles de complejidad social y económica.

En un [estudio reciente de Nature Energy](#), el profesor Paul Brockway de la Universidad de Leeds informó que a medida que los combustibles fósiles se vuelven “más difíciles de alcanzar”, “requieren más energía para extraerse y, por lo tanto, tienen un ‘costo de energía’ cada vez mayor”. El estudio señaló que el RIE de los combustibles fósiles a menudo se sobreestima porque se mide justo en la boca del pozo en lugar del punto más relevante, que es donde la energía ingresa a la economía como electricidad o gasolina. El estudio concluyó que el RIE para los combustibles fósiles es “muy bajo... alrededor de 6:1 y está disminuyendo”. Ya ha disminuido en al menos un 10% en los últimos 25 años.

Una segunda conclusión crucial del trabajo es que, teniendo en cuenta el punto de consumo eléctrico, las renovables ya tienen un [RIE superior](#) al de los combustibles fósiles. Como la mayoría de los estudios del RIE de combustibles fósiles se realizan en la etapa equivocada, no son comparables con la generación eólica y solar, que producen electricidad que no requiere etapas adicionales. Mientras que el RIE de los combustibles fósiles está disminuyendo, la energía eólica y solar están experimentando lo contrario: una tendencia creciente del RIE con rendimientos crecientes y costos decrecientes. Por lo tanto, Brockway et. al concluyen que “la transición a las energías renovables puede detener, o incluso revertir, la disminución del RIE global en la etapa energética final”.

Los hallazgos de Nature Energy están corroborados por [un estudio RethinkX](#) más reciente sobre el costo nivelado de la electricidad (CONE), que mide el costo promedio de generar electricidad durante toda la vida útil de una planta de energía, incluidos sus costos de construcción y operación. Ese estudio encontró que las estimaciones convencionales del CONE de la Agencia Internacional de Energía (AIE) y la Administración de Información de Energía (AIE) subestiman el costo por kilovatio hora del carbón, el gas y la energía hidroeléctrica a gran escala hasta en un 400%. Esto sugeriría que su RIE es significativamente más bajo que la mayoría de las estimaciones publicadas.

Mientras tanto, como incluso las cifras CONE convencionales muestran que la energía solar, eólica y las baterías (SEB) ya han alcanzado la paridad con los combustibles fósiles, estos hallazgos indican que SEB ya es mucho más barato, en consonancia con un RIE más alto.

Defectos en el pensamiento convencional

A pesar de los hallazgos del artículo de Brockway, la idea de que las energías renovables tienen un RIE más bajo que los combustibles fósiles es un concepto erróneo persistente que ha afectado a muchos otros estudios que no logran dar cuenta completa de estas tecnologías. Estos errores se pueden encontrar en muchos lugares, sobre todo en el famoso documental de Michael Moore, Planet of the Humans. Más recientemente, el [Servicio Geológico de Finlandia](#) publicó un artículo repitiendo tales errores, al igual que la [revista Energies](#).

Hay problemas significativos con estos enfoques. Uno de los más notorios es la afirmación de que los paneles solares tienen una vida útil de alrededor de 20 a 30 años. Por lo tanto, los cálculos conservadores de RIE convencionales para la energía solar sitúan los cálculos de RIE en algún lugar [alrededor de 10:1](#) para Suiza. Esto ya es más alto que el 6:1 de los combustibles fósiles demostrado por Brockway et. al.

Sin embargo, los paneles solares no se queman espontáneamente después de dos o tres décadas. Más bien, su eficiencia disminuye con el tiempo en una pequeña cantidad cada año. Esto significa que después de 20 años, la mayoría de los paneles solares seguirán funcionando al [90 % de su capacidad](#). Esto sugiere que es probable que su vida útil se extienda muchas décadas más allá de los 30 años, tanto como [40 o 50 años](#), si no más, con una disminución gradual de la eficiencia, lo que sugiere que incluso la estimación de 10:1 es demasiado baja y el RIE solar puede estar más cerca de 20:1.

De manera similar, [un estudio de Renewable Energy](#) de 2014 confirma que la vida útil de las turbinas eólicas se extenderá a por lo menos 25 años, y las turbinas más recientes pueden durar más. Hoy en día, algunos de los [componentes más importantes](#) para la energía eólica, como transformadores, cables de tierra de cobre y torres, entre otros, tienen una vida útil de 50 años o más. Una vez más, la trayectoria es para un valor de RIE más alto, particularmente a medida que estas tecnologías continúan mejorando en rendimiento.

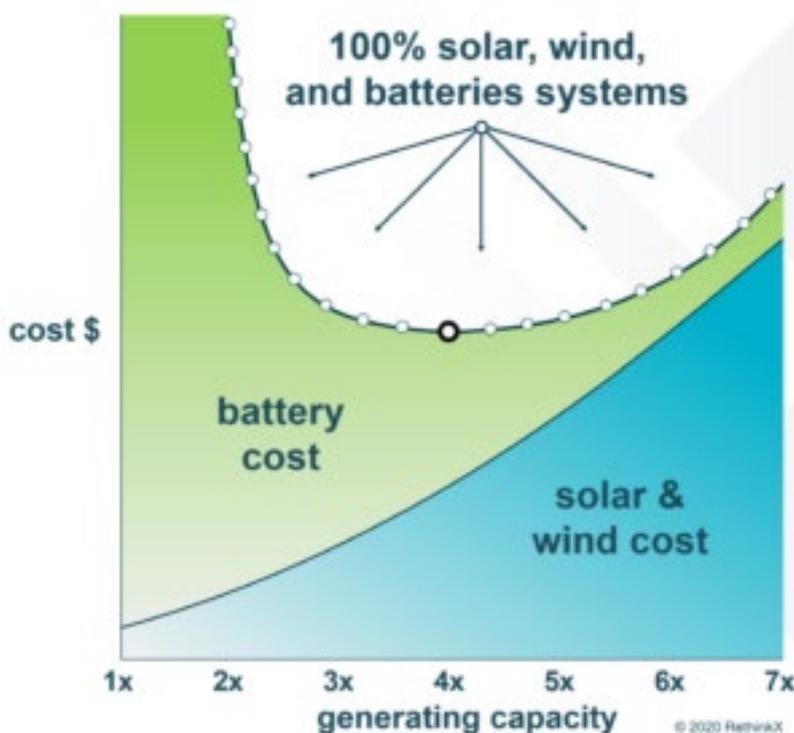
La recuperación de la energía de la energía solar y eólica también es fenomenal y representa una fracción de la huella de carbono de los combustibles fósiles, incluso si la captura y el almacenamiento de carbono llegaran a funcionar. Un [estudio de Nature Energy](#) de 2017 encontró que las huellas de carbono de por vida de la energía solar y eólica son aproximadamente una vigésima parte de las del carbón y el gas, incluidas la fabricación y la construcción. Las instalaciones solares y eólicas también producen 26 y 44 veces más energía que la energía utilizada para construirlas, respectivamente.

La ecuación de la batería: la curva U de energía limpia

Hasta ahora, hemos comparado la energía solar y eólica con los combustibles fósiles como si fueran a sustituirlos uno por uno. En cambio, la disrupción de la energía limpia transformará toda la arquitectura del sistema energético.

Como ejemplo de esto, muchos modelos influyentes reducen el RIE de las instalaciones solares y eólicas al incorporar el papel del almacenamiento en baterías. Por supuesto, el almacenamiento de la batería es necesario para abordar el problema de la intermitencia: el sol no siempre brilla y el viento no siempre sopla. El almacenamiento de baterías se agrega a la generación solar y eólica para capturar energía mientras se produce y luego distribuirla cuando no se produce. Ayuda a reducir la necesidad de “reducir” la energía limpia, es decir, cortar deliberadamente la producción de energía debido a la incapacidad de transmitirla.

Un análisis lineal da cuenta de las entradas de energía adicionales necesarias para fabricar e instalar baterías de almacenamiento, y concluye que esto implica que entra más energía para producir la misma salida de energía y un RIE más bajo en general. Sin embargo, esa conclusión es sólo la mitad de la respuesta, basada en un enfoque limitado del diseño solar, eólico y de baterías (SEB). Calcula los valores del RIE para cada componente y luego los agrega sin reconocer completamente hasta qué punto un sistema de este tipo puede producir un excedente de energía. De hecho, no refleja cómo funciona un sistema SEB en la práctica.



Cuando los científicos de la Universidad de Waterloo intentaron **su propio análisis** examinando datos reales de instalaciones de energía renovable, descubrieron que, lejos de reducir el RIE de los parques solares y eólicos, la adición de baterías de iones de litio en realidad aumentaba el RIE al poner a disposición energía que de lo contrario, se perderá ante la reducción:

El nuevo sistema de energía limpia podrá generar tres veces más energía que el sistema actual de combustibles fósiles, gran parte de ella casi gratis la mayoría de los días del año.

“Descubrimos que las baterías de iones de litio aumentan el RIE de los parques eólicos y solares”. Mejores líneas de transmisión a la red permitirían mejoras adicionales.

Este estudio también fue demasiado estrecho, ya que se centró en plantas de energía renovable individuales, en lugar de ver cómo operarían los sistemas SEB en el contexto de toda una ciudad, región o nación. Como resultado, la mayoría de los analistas terminan subestimando aún más el potencial RIE de los sistemas SEB porque descuidan los beneficios sistémicos netos de dichos sistemas en escalas más amplias y sobrestiman el papel de las baterías en el sistema. Las instalaciones SEB no simplemente reemplazarán las plantas de combustibles fósiles: crearán nuevas arquitecturas de sistemas de energía que requieren una nueva comprensión. Como resultado, los estudios que asumen que el RIE para un sistema global de energía renovable se reducirá en comparación con el de los combustibles

fósiles están comparando manzanas y naranjas.

Una [revisión de One Earth](#) de 2019 concluyó que un cambio global a SEB no disminuiría el RIE en absoluto. El estudio señaló que la visión pesimista se basa en una metodología lineal de extrapolar hacia adelante “tendencias de transición a corto plazo en la transición energética (fotovoltaica y eólica reemplazando al carbón, biocombustibles reemplazando al petróleo)” de una manera que no reflejará todas las posibilidades de “ un sistema energético basado en el despliegue masivo de energía fotovoltaica y eólica barata”.

Por ejemplo, el documento apunta a un escenario rara vez considerado por algún modelo: “El tan comentado problema de la intermitencia que requiere respaldo fósil se puede revertir con un exceso significativo de energía fotovoltaica y eólica y convirtiendo el exceso de suministro eléctrico intermitente en combustibles”.

En este enfoque, construir mucha más energía solar y eólica de lo que se necesita, y luego implementar sistemas para extraer el excedente de energía para otros usos, reduce la necesidad de almacenamiento en baterías y hace que haya más energía disponible. En este caso, la sugerencia es usar el nuevo sistema de energía limpia para generar combustibles sintéticos, pero esa es solo una opción. En el escenario de One Earth, el RIE del nuevo sistema de energía limpia es de alrededor de 10:1, que no es tan diferente (y ya es más alto) que el sistema actual de combustibles fósiles. Sin embargo, este escenario es demasiado conservador y subestima las implicaciones transformadoras en todo el sistema de la disrupción de la energía limpia debido al despliegue masivo y las economías de escala que no surgen cuando se observan plantas de energía individuales de forma aislada.

El informe de [RethinkX, Rethinking Energy 2020-2030: 100% Solar, Wind and Batteries is Just the Beginning](#), muestra que, para suministrar energía durante los días más oscuros del invierno, necesitaremos generar un exceso de capacidad significativo en la generación solar y eólica. Esto producirá mayores cantidades de energía que el actual sistema de combustibles

fósiles, con mucha menos necesidad de baterías. Un sistema 100% SEB diseñado para proporcionar energía las 24 horas del día, los 7 días de la semana cuando el sol no brilla y el viento no sopla sería unas cinco veces más grande que un reemplazo uno a uno del sistema de combustibles fósiles, pero podría satisfacer la demanda de invierno con 30 a 40 veces menos almacenamiento de batería.

La “Curva en U de energía limpia” del informe traza la relación entre los costos de almacenamiento de baterías y la generación solar/eólica, lo que demuestra que esta combinación es el sistema óptimo, menos costoso y más rápido y fácil de implementar.

Figura 8. La curva U de energía limpia. Fuente: RethinkX (2020)

La curva se puede aplicar a diferentes regiones para determinar los detalles del despliegue óptimo. La mayoría de los días del año, este sistema SEB generará grandes cantidades de electricidad a un costo marginal cercano a cero. En lugar de desperdiciar esta energía reduciendo la producción, el nuevo sistema de energía creará un espacio de posibilidades completamente nuevo sobre cómo usar esta energía excedente barata para un sinfín de nuevas aplicaciones. En general, el informe estima que el nuevo sistema de energía limpia podrá generar tres veces más energía que el sistema actual de combustibles fósiles, gran parte de ella casi gratis la mayoría de los días del año.

La suposición de que la red actual centrada en los combustibles fósiles actuará como una restricción pasa por alto la realidad de cómo funcionan las disrupciones. La falta de carreteras pavimentadas no impidió que los automóviles se hicieran omnipresentes. En cambio, los automóviles estimularon el surgimiento de nuevas redes de transporte. Del mismo modo, las computadoras y los teléfonos inteligentes han afectado a las empresas de telecomunicaciones de la era de la telefonía fija y las han impulsado a evolucionar hacia Internet. El nuevo espacio de posibilidades representado por grandes cantidades de electricidad casi gratis durante la mayor parte del año incentivará y acelerará la evolución y transformación de la red en sistemas más grandes, más flexibles, diversos y capaces. RethinkX describe el espacio de posibilidades innovadoras abierto por el nuevo sistema de energía limpia como “Superpoder” porque, al interrumpir los modelos comerciales centrados en los combustibles fósiles, permitirá nuevos modelos comerciales con el potencial de una enorme creación de valor.

Otros investigadores ahora están corroborando estos hallazgos. Por ejemplo, Marc Pérez, de la Universidad de Columbia, descubrió que [generar un exceso de capacidad de energía solar y eólica](#) por un factor de tres veces la carga máxima no solo reduce la necesidad de almacenamiento en baterías, sino que reduce el costo de la electricidad hasta en un 75 %, al tiempo que elimina los problemas de intermitencia. El equipo de Pérez también hizo un estudio de caso en Minnesota. Descubrieron que la construcción excesiva de energía solar y eólica podría reducir la entrada de la batería para el almacenamiento estacional **hasta en un 90%**. La firma mundial de energía Wartsila [descubrió de manera similar](#) que el exceso de energía solar y eólica en cuatro veces la carga máxima no requiere almacenamiento estacional y solo necesita de 4 a 10 días de capacidad de almacenamiento de varios días, lo que lo convierte en el sistema de menor costo.

Estos estudios muestran que las suposiciones convencionales sobre el papel del almacenamiento en batería en la reducción drástica del RIE se basan en entendimientos obsoletos de una implementación SEB óptima. Y además, no apreciaron todas las implicaciones de “Superpoder”, donde en lugar de reducir este excedente de tres o cuatro veces, el sistema está diseñado para hacerlo accesible a la red.

Entonces, ¿cómo sería la producción de este sistema energético a escala global? Llegar a una cifra válida para esto es un desafío dado que dicho sistema aún no se ha construido y dada la necesidad de evitar las trampas de un enfoque lineal y aislado que descuida las propiedades novedosas del sistema de energía limpia.

Sin embargo, los científicos de los Laboratorios Federales Suizos de Ciencia y Tecnología de Materiales hicieron ese intento. Su [estudio en Energies](#) encontró en su escenario más conservador que la construcción excesiva de energía solar solo en el entorno construido podría generar 22 terawatts (TW) de electricidad, que es más de tres veces mayor que los niveles actuales de consumo de energía.

Aun así, incluso esta cifra apenas rasca la superficie de las posibilidades. El escenario no incorporó la energía eólica, ni tuvo en cuenta el potencial de las áreas del mundo que reciben la mayor radiación solar, como los desiertos del mundo. Por lo tanto, en su escenario más optimista, un sistema global que también aproveche y transmita la energía solar desde estas áreas podría generar 71 TW de electricidad, alrededor de 10 veces más que el consumo de energía actual. Esta extraordinaria conclusión sigue siendo conservadora, ya que no tiene en cuenta el potencial eólico, lo que añadiría otro orden de magnitud a estas cifras.

La implicación es que los datos más sólidos disponibles confirman que un nuevo sistema global de energía limpia sería capaz de proporcionar un nivel de energía inconcebible para nuestras sociedades en la actualidad. Parece que todavía estamos subestimando el potencial.

Eso se debe a que otro error común es ver los sistemas SEB como tecnologías estáticas cuyo rendimiento opera a un nivel fijo. Este no es el caso. Las industrias de extracción de combustibles fósiles han entrado en una espiral mortal de rendimientos decrecientes, desempeño decreciente y costos crecientes. Por el contrario, los sistemas SEB son tecnologías disruptivas que experimentarían rendimientos crecientes, un rendimiento acelerado exponencialmente y costos decrecientes exponencialmente.

En 2017, los [científicos de la Universidad de Stanford](#) descubrieron que el RIE de la energía solar era tan alto como 27 en Arizona y 14 incluso en un área con poca luz solar como Alaska. Como la adición de baterías para autoconsumo sólo redujo esto en un 20 %, el RIE de un sistema de baterías solares en Alaska sería de alrededor de 11 y en Arizona de alrededor de 22. Agregar baterías para evitar la reducción podría aumentar el RIE general entre un 12 y un 42 %. El estudio concluyó que reducir la contribución de las baterías y maximizar la capacidad para devolver el exceso de energía a la red aumentaría el RIE.

De hecho, un [metaanálisis](#) de los estudios del RIE de la energía solar fotovoltaica en Renewable and Sustainable Energy Reviews encontró al RIE entre 9:1 (ya superior a la estimación actual de 6:1 de Brockway para los combustibles fósiles) para instalaciones más antiguas y 34:1 para

paneles de telurio de cadmio. Dado que el RIE histórico máximo del carbón se ha estimado en alrededor de 80, vale la pena señalar las conclusiones de este estudio: “En función de los potenciales de mejora de la eficiencia y la energía integrada discutidos en este documento, es probable que la tecnología fotovoltaica alcance el RIE máximo del carbón en el futuro”.

En realidad, [algunos estudios](#) ya sitúan el RIE de la energía solar fotovoltaica en más de 60:1. Según la Ley de Wright, que se ha [validado empíricamente](#) para docenas de tecnologías, y según las [previsiones de RethinkX](#) basadas en el marco de [disrupción tecnológica de Seba](#), SEB se encamina a volverse 10 veces más barato en las próximas dos décadas, mientras continúa mejorando su rendimiento. Un [estudio de 2021](#) realizado por el Instituto para el Nuevo Pensamiento Económico de la Universidad de Oxford corrobora los hallazgos de RethinkX, y ve reducciones de costos al ritmo actual durante al menos 15 años. Esto significa que es probable que las evaluaciones basadas en la tecnología actual mejoren en un orden de magnitud (diez veces) para 2030.

Los factores impulsores de esta mejora provendrán de las entradas y salidas del RIE. El progreso tecnológico mejorará los métodos de producción y, a medida que aumente el volumen de producción, los productores disfrutarán de mayores economías de escala. Los insumos de energía para fabricar paneles solares también disminuirán. Los paneles también están mejorando cada vez más en la captura de energía solar, lo que significa que su producción también aumentará. A medida que disminuyen los insumos de energía y aumenta la producción de energía, el RIE seguirá mejorando.

Los datos actuales indican cómo se desarrollará esto. El [Estudio de Futuros Solares](#) del Departamento de Energía de EUA, en una evaluación conservadora de las posibilidades, predice que las “mejoras continuas en la eficiencia fotovoltaica, el rendimiento energético de por vida y el costo” podrán generar “una reducción del 60% en los costos de energía fotovoltaica para 2030”. La energía solar fotovoltaica ya ha experimentado mejoras exponenciales en la eficiencia, lo que ha dado como resultado que los paneles generen muchas veces más electricidad que hace varias décadas. Los primeros paneles en [1955 comenzaron con una eficiencia del 2%](#). Para 1985, esta eficiencia se disparó al 14 %, produciendo un 600 % más de energía que en 1955. Para 2020, había aumentado a un promedio de [alrededor del 22 %](#), produciendo un 57 % más de energía que en 1985. Esa mejora [aún continúa](#), con nuevas innovaciones ya apunta a eficiencias venideras del 27.3%. La eficiencia de las turbinas eólicas y el almacenamiento de baterías también están mejorando a un ritmo similar. Con base en estas tendencias, es razonable esperar que el RIE de SEB continúe mejorando.

Todo esto sugiere que el RIE de un sistema global de energía limpia desplegado de manera óptima sería un orden de magnitud mayor que el sistema de combustibles fósiles existente, especialmente en sitios con un despliegue óptimo y una mayor disponibilidad de energía solar o eólica. La estimación conservadora del RIE de One Earth de 10:1 puede incluso subestimar el RIE de un nuevo sistema global de energía limpia para 2030. Dadas las cifras conservadoras citadas que sugieren una reducción del 60 % en la entrada de energía y otro aumento del 60 % en la producción para 2030, el aumento acumulado de la eficiencia energética del 120 % sugeriría un RIE de 22:1. Este sigue siendo un escenario de gama baja. Si los valores de RIE actuales para la energía solar fotovoltaica están entre 30:1 y 60:1 según la región, entonces un

aumento del 120 % en las mejoras de rendimiento durante una década podría producir valores de RIE entre 66:1 y 132:1. Para 2040, eso podría aumentar aún más con más investigación y desarrollo.

La implicación es que la disrupción de la energía limpia basada en SEB presagia el potencial de abrirse camino hacia un nuevo sistema de energía como nunca habíamos visto. Permitirá a la humanidad no solo satisfacer nuestras necesidades energéticas de manera sostenible, sino también electrificar una amplia gama de servicios públicos que ahora generan costos energéticos y ambientales desmesurados.

Este nuevo espacio de posibilidades ha sido [reconocido incluso por científicos](#) en Energy & Environmental Science, publicado por la Royal Society of Chemistry. Al preguntar si podría haber “otros usos para la electricidad generada por energía eólica o solar que, de lo contrario, se almacenaría o reduciría”, el documento sugiere: “el exceso de electricidad podría usarse en aplicaciones donde la necesidad de energía bajo demanda es baja y no están fuertemente en desventaja por la intermitencia, por ejemplo, desalinizando o purificando agua o accionando bombas de riego. Estas condiciones podrían resultar en valores de red RIE altos con beneficios para la sociedad que van más allá del sector de la red eléctrica”.

La clave, entonces, es optimizar el despliegue de SEB utilizando la curva U de energía limpia para generar la mayor cantidad posible de electricidad excedente, al menor precio posible, generando la mayor cantidad de “Superpoder” de una manera que elimine los problemas de intermitencia. Al permitir entonces la electrificación de una amplia gama de industrias y sectores, desde el tratamiento de aguas residuales hasta el reciclaje, desde la minería hasta la fabricación, “Superpoder” limpiará sus huellas energéticas.

Esto significa que, por primera vez, la gran cantidad de “Superpoder” generada por el nuevo sistema nos permitirá sustentar los extensos nuevos procesos industriales necesarios para la economía circular de una manera que antes era inconcebible. “Superpoder” en el nuevo sistema permitirá el mantenimiento continuo y el reemplazo de sus tecnologías de componentes de manera sostenible.

Incluso dentro del sistema actual, es posible ver cómo la creciente demanda de minerales críticos impulsará la demanda de reciclaje, lo que impulsará [mayores economías de escala](#) y reducciones de costos. En el nuevo sistema de energía limpia, “Superpoder” hará que el reciclaje sea comercialmente viable y tecnológicamente eficiente de una manera que era imposible dentro del viejo paradigma. Todas las tecnologías de extracción y fabricación de SEB serán sostenibles gracias a las grandes cantidades de electricidad barata generada por el nuevo sistema.

De la misma manera, mientras se acelera la disrupción de la energía limpia, se entrelazará con las disrupciones de VEs, VEs autónomos, transporte como servicio (TcS), fermentación de precisión (FP) y agricultura celular (AC) en los sectores de

Podemos ahora imaginar la prosperidad económica para todas las personas, proporcionando energía avanzada, alimentos, movilidad, educación e infraestructura a una décima parte de los costos de los sistemas existentes.

Podemos ahora imaginar la prosperidad económica para todas las personas, proporcionando energía avanzada, alimentos, movilidad, educación e infraestructura a una décima parte de los costos de los sistemas existentes.

transporte y alimentos. Los efectos combinados y en cascada de estas interrupciones nos permitirán, si así lo elegimos, reducir las emisiones de carbono mucho más rápido (90 % para 2035) de lo que antes se creía posible. Permitirán además una amplia gama de mecanismos de extracción de carbono que son insostenibles bajo el sistema de combustibles fósiles y liberarán miles de millones de acres de tierra para permitir la reforestación pasiva, la reforestación activa, la reconstrucción y la conservación a gran escala.

La dinámica en cascada de estas interrupciones simultáneas culminará en última instancia en la reducción de la huella material de la civilización industrial. El colapso de las industrias intensivas en carbono en energía, transporte y alimentos terminará con la enorme demanda de logística y transporte global, liberará miles de millones de hectáreas de **tierra**, permitirá que los **océanos** se regeneren y eliminará la **contaminación del aire**. Con las elecciones correctas, los nuevos sistemas de energía, transporte y alimentos habilitados por estas interrupciones tecnológicas conducirán a **una reducción neta en la intensidad material** de la civilización humana.

Este es solo el comienzo.

A continuación, si bien el despliegue inicial del nuevo sistema de energía, transporte y alimentos requerirá la movilización de los materiales y los recursos de capital del sistema económico industrial agonizante, una vez que se establezca, el nuevo sistema no sufrirá los mismos impactos de oferta y dinámica de precios del antiguo sistema centralizado de energía. En cambio, datos convincentes muestran que, con un despliegue óptimo, el nuevo sistema podrá generar al menos tres veces más energía que el sistema de combustibles fósiles, pero con costos marginales cercanos a cero durante la mayor parte del año, con el potencial de **generar 10 veces más**.

Eso permitirá la electrificación de una amplia gama de servicios, como la minería, la fabricación, el reciclaje y el tratamiento de aguas residuales, lo que significa que podremos sostener, mantener y operar el sistema aprovechando la energía del sol y el viento.

Una vez que el nuevo sistema de energía limpia comienza a suministrar los flujos de materiales para mantener el sistema SEB global, aparece un espacio de posibilidades sin precedentes. Podremos mantener e incluso expandir el sistema de energía limpia sin traspasar los límites planetarios. Los aumentos adicionales en el rendimiento del material ya no dependerán de los límites de extracción de combustibles fósiles. En cambio, el nuevo sistema de energía limpia los sustentará sin desestabilizar los límites planetarios. Esto no es automático. Requiere las elecciones correctas para organizar esos flujos de materiales. Eso significa que la intensidad material podría aumentar dramáticamente, sostenida por el sistema de energía limpia, si los tomadores de decisiones diseñan el sistema para evitar dañar a los ecosistemas. Esto sugiere

que el desacoplamiento será posible, pero sólo en el nuevo sistema. Esto significa que el sistema de energía limpia permitirá la expansión de su poder de producción de energía desde dentro del sistema existente, permitiendo mayores aumentos potenciales en la capacidad de generación y, por lo tanto, mayores aumentos en el RIE general del sistema, creando una nueva base para mejorar continuamente la prosperidad limpia global.

Con vastas áreas de tierra liberadas debido a las disrupciones, y con avances de orden de magnitud en energía limpia y mano de obra autónoma, los métodos naturales y tecnológicos de extracción de carbono inviábiles en el sistema de combustibles fósiles se volverán **baratos y viables**, abriendo oportunidades sin precedentes para la reconstrucción y regeneración ecológica de nuestra tierra, aire y agua. Esas tecnologías no son factibles dentro del paradigma actual, pero lo serán después de la transformación de los sistemas de producción a través de las cinco principales disrupciones tecnológicas actuales, y si la sociedad toma ciertas decisiones necesarias.

Esto no sucederá por sí solo. Tendremos que elegir este camino, adoptando un nuevo sistema de valores en el que le demos valor real a la protección de nuestro planeta. Este sistema de valores centrado en la Tierra implica extraer y reciclar materiales de manera responsable mientras se invierte en la restauración de la Tierra de una manera que mejorará las condiciones para todas las especies. Si elegimos este camino, se podría permitir una nueva forma de prosperidad económica y ecológica vibrante. Hacerlo es una cuestión de supervivencia. Si nos negamos a abrazar esta transformación, si retrasamos las disrupciones prolongando la vida de las industrias y los sistemas establecidos o disminuimos nuestra huella material dentro de estos sistemas, entonces esas industrias y sistemas, y con ellos nuestra civilización, podrían colapsar antes de que llegemos al nuevo sistema.

Entonces, con las opciones correctas, habrá nuevas y tremendas formas de crear valor económico dentro de un nuevo sistema post-carbono sin dañar a la Tierra. De hecho, aprovechando estas tecnologías existentes, podemos ahora imaginar la prosperidad económica para todas las personas, proporcionando energía avanzada, alimentos, movilidad, educación e infraestructura a una décima parte de los costos de los sistemas existentes.

Habilitar y optimizar estas posibilidades requerirá que transformemos el sistema organizativo de la civilización. Por ejemplo, tendremos que dismantelar los monopolios de servicios públicos de energía centralizados existentes y crear nuevos derechos de propiedad individual para poseer y comercializar electricidad. También necesitaremos abrir los derechos de propiedad intelectual para facilitar los sistemas de código abierto que permitan el diseño global y la implementación local. Estos son solo algunos ejemplos. Tales transformaciones darán como resultado un cambio de la propiedad centralizada a la descentralizada, lo que permitirá a las personas producir su propia energía y alimentos. Esto implica una transformación en las estructuras de propiedad de la producción económica que implica un cambio total en la relación entre trabajo y capital que no se ajusta a las ideologías económicas actuales.

Las ideologías económicas existentes no nos ayudan a entender la próxima economía. Involucrará emprendimiento individual, procesos de diseño colectivo, protocolos de distribución

compartidos a través de redes participativas interconectadas en lugar de jerarquías de arriba hacia abajo. Implicará una forma de mayor prosperidad económica, incluida una mayor capacidad y eficiencia para satisfacer nuestras necesidades materiales clave, acompañada de una menor huella ecológica. Conllevará el despliegue y mantenimiento de un almacén de entradas y salidas materiales para que el sistema continúe existiendo, que luego, por primera vez, podrá crecer dentro de los límites planetarios gracias a la mayor y creciente capacidad de aprovechar la energía limpia.

Estamos a la vista de una civilización ecológica tecnológicamente avanzada y económicamente próspera. Armados con esta comprensión de lo que es posible, podemos reconocer la necesidad de repensar el paradigma económico industrial convencional de una manera que abarque un nuevo espacio de posibilidades que no se puede definir, restringir o comprender utilizando las viejas herramientas, ideas, creencias y valores.

Pero este sistema no se implementará automáticamente. Las sociedades y los tomadores de decisiones deben comprender el espacio de posibilidades que se avecina y **tomar las decisiones correctas** para llegar ahí. La economía habitual, los servicios públicos de energía centralizados y las métricas tradicionales de las antiguas industrias energéticas jerárquicas son incompatibles con el nuevo sistema. Su despliegue óptimo requerirá repensar todos nuestros sistemas de organización social, creencias, valores y mentalidades. Si no tomamos las decisiones correctas ahora, nuestra **civilización podría colapsar** como las anteriores en medio de una tormenta perfecta de crisis autoinducidas.

El camino por delante no será simple ni fácil. Primero debemos despertar a la posibilidad de que durante las próximas décadas tengamos la oportunidad de caminar hacia un nuevo paradigma económico diferente a todo lo que hemos visto antes, uno que puede enriquecer todas nuestras vidas y regenerar la Tierra.

¿Qué sigue?

Las principales barreras para la implementación y aceleración son:

- **La incumbencia y sus intereses y la captura de las instituciones estatales**
- **Pensamiento aislado, perpetuado por los beneficiados**
- **La falta de previsión entre los tomadores de decisiones**

Hay algunas formas importantes de acelerar la transformación. No todos las implementarán, pero será factible para los países o regiones que puedan reconocer lo que está sucediendo y tomar mejores decisiones. Una vez que algunas entidades apliquen estas políticas, se tendrá un efecto dominó.

1. El primer paso es despertar. Los ciudadanos, los grupos de presión, las empresas, las industrias y, por supuesto, los tomadores de decisiones deben ser plenamente conscientes del enorme espacio de posibilidades sociales y de civilización que está surgiendo en este momento debido al potencial combinado de las disrupciones tecnológicas en los sectores de la energía, el transporte, los alimentos, la información y los materiales. Reconocer este espacio

de posibilidades no implica una creencia “tecnocéntrica” de que la tecnología por sí sola puede salvarnos. Por el contrario, implica el reconocimiento de que, si bien ya contamos con todas las herramientas que necesitamos para transformar nuestras sociedades y resolver nuestros mayores desafíos globales (no necesitamos esperar a que se produzcan avances), debemos adoptar nuevas mentalidades, gobernanza y sistemas organizativos para gestionar el sistema productivo que está surgiendo. Cuantas más personas puedan comprender la transformación que ya se está desarrollando y sus oportunidades para la prosperidad compartida, mayor será el alcance de las conversaciones y acciones que pueden acelerar y aprovechar esa transformación.

2. La principal prioridad política debe ser acabar con los subsidios y las nuevas inversiones para las industrias establecidas (lo cual no debe entrar en conflicto con un apoyo temporal muy específico para garantizar la continuidad y diversificación en el contexto de las repercusiones de la crisis Rusia-Ucrania). Aunque el precio del carbono es una opción para hacer que los que contaminan paguen, no lo necesitamos. Los mercados ya están distorsionados por los rescates de billones de dólares a los beneficiados. La idea más importante aquí es que estos activos ya están varados. Las industrias del petróleo, el gas, el carbón, la ganadería y las empresas de MCI están muy sobrevaluadas hoy en día, lo que significa que los inversionistas no se recuperarán ni obtendrán rendimientos de sus inversiones. Los subsidios del gobierno a estas industrias son efectivamente rescates a industrias en bancarrota. Por lo tanto, en lugar de utilizar la fijación de precios del carbono, el primer paso para crear mercados viables de energía y electricidad es poner fin a estos subsidios. Al hacerlo, el mercado se convertirá en un campo de juego nivelado. También liberará a los gobiernos para invertir esos billones en las innovaciones que van a transformar las sociedades para mejorar.

3. El camino más efectivo para terminar con estos subsidios es aprovechar a los gobiernos que ya están viendo la situación y actuando en consecuencia. Los miembros de Beyond Oil & Gas Alliance son buenos candidatos. Necesitamos alentar a estos gobiernos, que ya están comprometidos con la eliminación gradual de los combustibles fósiles, para que lideren y eliminen por completo sus subsidios a los combustibles fósiles. La otra puerta abierta en esto es la comunidad financiera y de inversión. Algunos están demasiado comprometidos con los beneficiados, pero muchas instituciones financieras comenzarán a cambiar sus carteras cuando reconozcan que están invirtiendo en industrias efectivamente en bancarrota. Necesitamos llevar esta inteligencia sobre la transformación a líderes en el sector financiero para estimular el cambio. Cuando una parte significativa de los gobiernos y las instituciones financieras comiencen a sacar dinero de los combustibles fósiles, habrá un punto de inflexión que ayudará a impulsar un cambio global. No necesitamos billones de dólares en subsidios estatales para financiar la transición. Dado que las tecnologías clave ya existen y están listas para escalar (si es que aún no están escalando), podemos aprovechar el mercado para hacer la mayor parte del trabajo. Sólo tenemos que acelerarlos. Al nivelar el campo de juego del mercado, reducimos las barreras a la aceleración.

4. Necesitamos crear nuevos derechos para que las personas puedan operar en los mercados de energía eléctrica. Eso significa romper los monopolios de servicios públicos centralizados en energía. Esto fomentará la descentralización y la distribución y acelerará la transformación. Lo mismo se aplica a los sectores del transporte y la alimentación. Los gobiernos deben dismantelar las estructuras regulatorias existentes que protegen a los beneficiados. Deben crear nuevas regulaciones para los nuevos sistemas de energía, alimentos y transporte que, entre otras cosas, cambien las leyes de propiedad intelectual para facilitar el intercambio de información de código abierto global.

5. Hay áreas clave en las que el mercado no puede ayudar, como la electrificación de la calefacción y la industria. Sin embargo, los gobiernos pueden acelerar la transformación al redirigir una parte de su enorme gasto en combustibles fósiles hacia la financiación de la electrificación de la calefacción y la infraestructura industrial. Esto puede dar lugar a importantes dividendos. En lugar de gastar billones en cosas como la captura de carbono y el hidrógeno destinados a lidiar con industrias “difíciles de reducir”, podemos aprovechar el potencial de escala de la energía solar, eólica y de baterías para hacer la transición de las industrias al nuevo sistema de energía limpia. El dividendo aquí es la oportunidad de reducir los costos rápidamente. En un sistema donde la energía limpia tiene costos marginales de casi cero durante la mayor parte del año, solo podemos imaginar lo que eso podría hacer para las industrias que actualmente dependen de los costosos combustibles fósiles.

6. Necesitamos tener un plan para proteger a las personas y comunidades durante las transformaciones. El colapso de las industrias establecidas no tiene por qué resultar en el colapso de los medios de vida si los tomadores de decisiones planifican este cambio e invierten en la transición de los trabajadores a los nuevos sistemas. Esto requiere liquidar las industrias establecidas en un cronograma basado en la ciencia y apoyar la capacitación de los trabajadores. Esto también requiere reconocer las tremendas oportunidades del nuevo sistema, que según la mayoría de las estimaciones creará una mayor cantidad de puestos de trabajo que las industrias establecidas, lo que implica amplias habilidades y oportunidades de autodesarrollo. Del mismo modo, los estados productores de petróleo deberían reconocer la oportunidad que tienen ante sí de convertirse en las principales superpotencias solares del mundo. Hacerlo puede permitirles salir rápidamente de la dependencia de los ingresos por exportaciones de petróleo y liderar el camino en la evolución de un nuevo paradigma económico basado en la prosperidad de la energía limpia.

Estos son algunos de los pasos más importantes, pero en su centro está la necesidad de acelerar la conciencia de la inevitabilidad del cambio disruptivo de nuestros sistemas de producción, reconociendo sus implicaciones transformadoras y comprendiendo las oportunidades masivas y el espacio de posibilidades de esta transformación. Eso no se entiende apropiada o ampliamente. La narrativa que prevalece es la de tener que hacer dolorosos sacrificios para salvarnos de una ruina casi segura, en lugar de acelerar las transformaciones positivas que no solo nos empoderarán para evitar la ruina, sino que nos impulsarán a nuevas alturas de prosperidad de una manera que beneficie a todas las personas y todas las especies

La descarbonización no es un sacrificio. Nos ahorrará billones y contribuirá a una mayor riqueza global y una mayor distribución de esa riqueza. Entonces, un paso clave es cambiar la narrativa para ayudar a cambiar la mentalidad. Cuando los tomadores de decisiones clave y las personas influyentes se dan cuenta de este espacio de posibilidades, es más probable que se unan para mover la aguja.

Referencias

- Ahmed, N. (2021, October 6).** *Unimaginable Clean Energy Abundance Could Be Ours—Ending the Age of Resource Scarcity Part 2—Rethink Disruption.* <https://rethinkdisruption.com/unimaginable-clean-energy-abundance-could-be-ours-ending-the-age-of-resource-scarcity-part-2/>
- Arbib, J., Dorr, A., & Seba, T. (2021).** *Rethinking Climate Change: How Humanity Can Choose to Reduce Emissions 90% by 2035 through the Disruption of Energy, Transportation, and Food with Existing Technologies.* <https://www.rethinkx.com/climate-implications>
- Arbib, J., & Seba, T. (2017).** *Rethinking Transportation 2020-2030: The Disruption of Transportation and the Collapse of the Internal-Combustion Vehicle and Oil Industries.* RethinkX. <https://www.rethinkx.com/transportation>
- Arbib, J., & Seba, T. (2020).** *Rethinking Humanity: Five Foundational Sector Disruptions, the Lifecycle of Civilizations, and the Coming Age of Freedom.* Rethink X. <https://static1.squarespace.com/static/585c3439be65942f022bbf9b/t/5f436dfe85783706be4a315a/1598254621881/RethinkX+Humanity+Report.pdf>
- Barnhart, C. J., Dale, M., Brandt, A. R., & Benson, S. M. (2013).** The energetic implications of curtailing versus storing solar- and wind-generated electricity. *Energy & Environmental Science*, 6(10), 2804–2810. <https://doi.org/10.1039/C3EE41973H>
- Bhandari, K. P., Collier, J. M., Ellingson, R. J., & Apul, D. S. (2015).** Energy payback time (EPBT) and energy return on energy invested (EROI) of solar photovoltaic systems: A systematic review and meta-analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 47, 133–141. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.02.057>
- Brockway, P. E., Owen, A., Brand-Correa, L. I., & Hardt, L. (2019).** Estimation of global final-stage energy-return-on-investment for fossil fuels with comparison to renewable energy sources. *Nature Energy*, 4(7), 612–621. <https://doi.org/10.1038/s41560-019-0425-z>
- Central, B. M., Climate. (n.d.).** *Renewables Are as Green as You'd Expect.* Scientific American. Retrieved 19 May 2022, from <https://www.scientificamerican.com/article/renewables-are-as-green-as-you-d-expect/>
- Court, V., & Fizaine, F. (2017).** Long-Term Estimates of the Energy-Return-on-Investment (EROI) of Coal, Oil, and Gas Global Productions. *Ecological Economics*, 138, 145–159. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2017.03.015>
- Delannoy, L., Longaretti, P.-Y., Murphy, D. J., & Prados, E. (2021).** Peak oil and the low-carbon energy transition: A net-energy perspective. *Applied Energy*, 304, 117843. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117843>
- Desing, H., Widmer, R., Beloin-Saint-Pierre, D., Hirschier, R., & Wäger, P. (2019).** Powering a Sustainable and Circular Economy—An Engineering Approach to Estimating Renewable Energy Potentials within Earth System Boundaries. *Energies*, 12(24), 4723. <https://doi.org/10.3390/en12244723>
- Dorr, A., & Seba, T. (2020).** *Rethinking Energy 2020-2030: 100% Solar, Wind, and Batteries is Just the Beginning.* RethinkX. <https://www.rethinkx.com/energy>
- Dorr, A., & Seba, T. (2021).** *The Great Stranding: How Inaccurate Mainstream LCOE Estimates are Creating a Trillion-Dollar Bubble in Conventional Energy Assets.* <https://www.rethinkx.com/energy-lcoe>
- Dynamic Energy Return on Energy Investment (EROI) and material requirements in scenarios of global transition to renewable energies—ScienceDirect. (n.d.).** Retrieved 19 May 2022, from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211467X19300926>
- Ecofys. (n.d.).** *Critical materials for the transition to a 100% sustainable energy future.* World Wildlife Fund. Retrieved 19 May 2022, from https://awsassets.panda.org/downloads/critical-materials_report___jan_2014_lr.pdf
- Energy Return on Energy Invested (EROEI) for photovoltaic solar systems in regions of moderate insolation: A comprehensive response—ScienceDirect. (n.d.).** Retrieved 19 May 2022, from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421516307066>
- Ghiassi-Farrokhfal, Y., Keshav, S., & Rosenberg, C. (2014).** An EROI-based analysis of renewable energy farms with storage. *Proceedings of the 5th International Conference on Future Energy Systems*, 3–13. <https://doi.org/10.1145/2602044.2602064>
- Grant, N. (2021, October 4).** *Ending the Age of Resource Scarcity Part 1—Why mineral shortages won't derail clean energy—Rethink Disruption.* <https://rethinkdisruption.com/part-1-the-mythology-of-mineral-shortages/>
- Hertwich, E. G., Gibon, T., Bouman, E. A., Arvesen, A., Suh, S., Heath, G. A., Bergesen, J. D., Ramirez, A., Vega, M. I., & Shi, L. (2015).** Integrated life-cycle assessment of electricity-supply scenarios confirms global environmental benefit of low-carbon technologies. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(20), 6277–6282. <https://doi.org/10.1073/pnas.1312753111>
- How does wind farm performance decline with age? - ScienceDirect. (n.d.).** Retrieved 19 May 2022, from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148113005727>
- Institute for Sustainable Futures. (2021).** *Reducing new mining for electric vehicle battery metals: Responsible sourcing through demand reduction strategies and recycling.* Earthworks. <https://41p14t2a856b1gs8ii2wv4k4-wpengine.netdna-ssl.com/assets/uploads/2021/04/UTS-EV-battery-metals-sourcing-20210419-FINAL.pdf>
- Kelly-Detwiler, P. (n.d.).** *Solar Technology Will Just Keep Getting Better: Here's Why.* Forbes. Retrieved 19 May 2022, from <https://www.forbes.com/sites/peterdetwiler/2019/09/26/solar-technology-will-just-keep-getting-better-heres-why/>

KU Leuven. (n.d.). *Metals for Clean Energy: Pathways to solving Europe's raw materials challenge.* Eurometaux. Retrieved 19 May 2022, from <https://eurometaux.eu/media/20ad5yza/2022-policy-maker-summary-report-final.pdf>

Kurland, S. D., & Benson, S. M. (2019). The energetic implications of introducing lithium-ion batteries into distributed photovoltaic systems. *Sustainable Energy & Fuels*, 3(5), 1182–1190. <https://doi.org/10.1039/C9SE00127A>

Leccisi, E., Raugei, M., & Fthenakis, V. (2016). The Energy and Environmental Performance of Ground-Mounted Photovoltaic Systems—A Timely Update. *Energies*, 9(8), 622. <https://doi.org/10.3390/en9080622>

Leger, D., Matassa, S., Noor, E., Shepon, A., Milo, R., & Bar-Even, A. (2021). Photovoltaic-driven microbial protein production can use land and sunlight more efficiently than conventional crops. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 118(26), e2015025118. <https://doi.org/10.1073/pnas.2015025118>

Mineral constraints for transition overstated by IEA. (2021, May 10). Carbon Tracker Initiative. <https://carbontracker.org/mineral-constraints-for-transition-overstated-by-iea/>

Nagy, B., Farmer, J. D., Bui, Q. M., & Trancik, J. E. (2013). Statistical Basis for Predicting Technological Progress. *PLOS ONE*, 8(2), e52669. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0052669>

Palmer, G. (2019). Renewables rise above fossil fuels. *Nature Energy*, 4(7), 538–539. <https://doi.org/10.1038/s41560-019-0426-y>

Pehl, M., Arvesen, A., Humpenöder, F., Popp, A., Hertwich, E. G., & Luderer, G. (2017). Understanding future emissions from low-carbon power systems by integration of life-cycle assessment and integrated energy modelling. *Nature Energy*, 2(12), 939–945. <https://doi.org/10.1038/s41560-017-0032-9>

Perez, M. (2014). *A Model for Optimizing the Combination of Solar Electricity Generation, Supply Curtailment, Transmission and Storage* [Columbia University]. <https://doi.org/10.7916/D8445JP4>

Rabago, K. R., & Perez, R. (n.d.). *A radical idea to get a high-renewable electric grid: Build way more solar and wind than needed.* The Conversation. Retrieved 19 May 2022, from <http://theconversation.com/a-radical-idea-to-get-a-high-renewable-electric-grid-build-way-more-solar-and-wind-than-needed-113635>

Rethink X. (2021). *Getting it right.* Rethink X. <https://www.rethinkx.com/getting-it-right>

Seibert, M. K., & Rees, W. E. (2021). Through the Eye of a Needle: An Eco-Heterodox Perspective on the Renewable Energy Transition. *Energies*, 14(15), 4508. <https://doi.org/10.3390/en14154508>

The Changing Meaning of Energy Return on Investment and the Implications for the Prospects of Post-fossil Civilization—ScienceDirect. (n.d.). Retrieved 19 May 2022, from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590332219302209#!>

Tubb, C., & Seba, T. (2019). *Rethinking Food and Agriculture 2020-2030: The Second Domestication of Plants and Animals, the Disruption of the Cow, and the Collapse of Industrial Livestock Farming.* RethinkX. <https://www.rethinkx.com/food-and-agriculture>

US Department of Energy. (2021). *Solar Futures Study.* <https://www.energy.gov/eere/solar/solar-futures-study>

Vries, E. de. (n.d.). *Extending turbine lifetime brings down CoE.* Retrieved 19 May 2022, from https://www.windpowermonthly.com/article/1142335/extending-turbine-lifetime-brings-down-coe?utm_source=website&utm_medium=social

Way, R., Mealy, P., Farmer, J. D., & Ives, M. (2021). *Empirically grounded technology forecasts and the... (Working Paper No. 2021-01).* Institute for New Economic Thinking. <https://www.inet.ox.ac.uk/publications/no-2021-01-empirically-grounded-technology-forecasts-and-the-energy-transition/>



Earth4All es una iniciativa internacional para acelerar los cambios de sistemas que necesitamos para un futuro equitativo en un planeta finito. Combinando la mejor ciencia disponible con el nuevo pensamiento económico, Earth4All fue diseñado para identificar las transformaciones que necesitamos para crear prosperidad para todos. Earth4All fue iniciado por el [Club de Roma](#), el [Instituto de Potsdam para la Investigación del Impacto Climático](#), el [Centro de Resiliencia de Estocolmo](#) y la [Escuela de Negocios de Noruega](#). Se basa en los legados de [Los límites del crecimiento](#) y los [marcos de los límites planetarios](#).

www.earth4all.life www.clubderoma.org.ar

Esta obra tiene una licencia Creative Commons
[Licencia Internacional Atribución no Comercial 4.0](#)

