

Energía: disrupciones tecnológicas sin avances en la transición ecológica*

KARENIA CÓRDOVA**
ALEXIS MERCADO

pp. 1-37

Resumen

A pesar del acelerado desarrollo de las energías alternas, que genera importantes impactos ambientales, la matriz energética global continúa asentada en los combustibles fósiles, persistiendo los problemas del calentamiento global que difícilmente se mantendrá por debajo de 2°C. Estando en marcha una revolución tecnológica, no se constata una transición energética limpia, puesto que se da en una trayectoria tecnoeconómica que demanda intensivamente materiales y energía. Las transformaciones tecnológicas son insuficientes para avanzar en la transición ecológica, llevando a analizar los cambios que promuevan esta transición, identificándolos en las interacciones en el sistema sociotécnico. Estos cambios deben ser impulsados por factores socio-institucionales que modifiquen la configuración de la matriz energética, reduzcan los desequilibrios de poder entre los actores con relación a la orientación del desarrollo tecnológico e impulsen cambios en el consumo final.

Palabras clave

Transición energética / Transición ecológica / Sistema sociotécnico / Disrupciones

Abstract

Despite the development of alternative energies, which is generating significant environmental impacts, the global energy matrix continues to be based on fossil fuels, with the problems of global warming persisting, which will hardly remain below 2°C. While a technological revolution is underway, a clean energy transition is not observed, because it occurs in a techno-economic trajectory that intensively demands materials and energy. Technological transformations are insufficient to advance to the ecological transition, leading to the analysis of the changes that promote this transition and identifying them in the interactions in the sociotechnical system. These changes must be driven by socio-institutional factors that modify the configuration of the energy matrix, reduce power imbalances between actors, in relation to the orientation of technological development and drive changes in final consumption.

Key words

Energy Transition / Ecological Transition / Sociotechnical System / Disruptions

* Este artículo es un aporte al proyecto de investigación: «Transformaciones sociotécnicas, degradación ambiental y ampliación de las asimetrías: América Latina en la transición ecológica» patrocinado por el Global Research of Paris (GRIP) y varias universidades latinoamericanas.

** Profesora Asociado, Instituto de Geografía-Universidad Central de Venezuela (UCV). Geógrafa (UCV). M.Sc en Planificación de Sistemas Energéticos, Universidad de Campinas, Brasil. Doctora en Arquitectura (UCV). Directora del IGDR. Coordinadora-Editora de la Revista Terra.
Correo-e: karenia@gmail.com

Profesor Titular emérito, Centro de Estudios del Desarrollo (Cendes) Universidad Central de Venezuela (UCV). Químico (UCV). M.Sc en Política Científica y Tecnológica, Universidad de Campinas, Brasil. PhD Estudios Sociales de la Ciencia (Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas -IVIC).
Correo-e: alexisms60@gmail.com

Introducción

Transcurridas algo más de dos décadas del siglo XXI, la matriz energética global continúa basándose fundamentalmente en los combustibles fósiles. En el año 2022, éstos respondían por el 82 por ciento del consumo primario global de energía y, si bien se constataba una reducción de su participación de poco más del 5 por ciento en el consumo total respecto al año 2010, ello no significó una disminución de su crecimiento. Por el contrario, registró un alza de 10,7 por ciento, aumentando de forma concomitante las emisiones de Dióxido de Carbono (CO₂) y agravándose los problemas asociados al calentamiento global.

Las energías alternas, por su parte, experimentaron importante crecimiento entre estos años, algo superior al 500 por ciento. No obstante, su participación en el consumo global de energía en 2022 alcanzó apenas el 7 por ciento. Esto, sin embargo, no las exime de estar generando nuevos y crecientes impactos ambientales. La matriz energética global preserva los peores efectos de las energías fósiles, al que se adicionan los de las fuentes alternas, complicando significativamente la situación socio-ambiental global.

La humanidad se debate entre un sostenido consumo de energía y recursos, y la necesidad de aminorar el calentamiento global y la contaminación. La imperativa reducción de los gases de efecto invernadero (GEI) presiona al abandono de los combustibles fósiles, impulsando el desarrollo de tecnologías que hacen aprovechables otras fuentes de baja emisión de dicho GEI. Paradójicamente, éstas últimas posibilitan mantener la vigencia de los grandes sistemas tecnológicos de la energía,¹ que son cimiento de una estructura económica global fundamentada en el crecimiento continuo. Es por esto que, aun cuando se introducen innovaciones radicales en la matriz energética –en los componentes técnicos– no ocurre, necesariamente, una efectiva sustitución de las energías fósiles, conservándose, además, un perfil de generación y consumo intensivo, no sustentable. De esa forma, será prácticamente imposible disminuir las emisiones para mantener el calentamiento global por debajo de los 1,5° centígrados, pero, incluso, el escenario de 2° C –nivel definido por el IPCC como límite recomendable para mitigar los impactos de los eventos climáticos extremos y limitar los

¹ Asumiendo la definición de Hughes (1987) que establece que los sistemas tecnológicos están integrados por componentes técnicos (artefactos y procesos de producción) y organizacionales (empresas manufactureras, de asistencia técnica y financieras). Integran, además, componentes científicos y de enseñanza, y de legislación como regulaciones y normas.

riesgos sobre la biodiversidad y los ecosistemas— también sería un objetivo inalcanzable, aun cumpliéndose las proyecciones más drásticas de disminución de emisiones (Hansen *et al.*, 2023).²

Los obstáculos para alcanzar estas metas se evidenciaron en la 28ª Conferencia de las Partes de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático,³ tanto en las desavenencias entre los países que aspiran una reducción progresiva (*phase-down*) en el uso de los combustibles fósiles—muchos de ellos productores—y los que aspiran su retirada progresiva o gradual (*phase out*) como en el reconocimiento, en el acuerdo final, de que «a pesar de los esfuerzos de mitigación, adaptación, medios de implementación y soporte, las partes están lejos de alcanzar el propósito del Acuerdo de París de 2015 y sus objetivos a largo plazo» (Lungenstrass *et al.*, 2023). Todo indica que falta mucho para lograr la transición energética.

En la insoluble asociación entre desarrollo y crecimiento económico radica la imposibilidad de avanzar hacia la transición ecológica, aspecto que será abordado en la primera parte de este artículo. En el acápite siguiente, se trabaja con los indicadores del PIB global y del consumo primario de energía, para mostrar su evolución, evidenciando que el crecimiento sostenido es consustancial al incremento del consumo energético. Seguidamente, se analizan los escenarios de calentamiento global, evidenciando que la matriz energética preserva rasgos claramente insustentables, lo que lleva a continuación a interrogarse si los cambios tecnológicos son suficientes para avanzar hacia una transición sociotécnica de la energía. Finalmente, se reflexiona sobre la naturaleza de las actuales transformaciones-socio técnicas y si son capaces de impulsar la transición ecológica.

Economía: fundamentos incuestionados e insustentabilidad

«La expansión es el estado normal de la economía».⁴ Esta frase sintetiza la finalidad de esta disciplina, destacándose en muchos casos, como correlato, que «la mayoría de las recesiones son breves y han sido raras en las últimas décadas» —apreciación asociada inequívocamente a «anomalía»—, siendo

² Se advierte que la temperatura media global entre febrero 2023 y febrero 2024 se ubicó en 1,56° centígrados por encima de los niveles preindustriales (<https://www.theguardian.com/environment/2024/mar/07/february-warmest-on-record-globally-copernicus-climate-change-service>).

³ Celebrada a finales de 2023 en Dubái.

⁴ «Expansion is the normal state of the economy» Una búsqueda en Google de esta frase, arrojó 186.000 resultados con coincidencia exacta en inglés y 911 en español. Se encuentra en artículos académicos y de prensa, informes técnicos de universidades, ministerios, consultoras, entre otros.

percibidas como tropiezos en la historia económica, caracterizada por la indetenible marcha del crecimiento (Rostow, 1959).⁵

Esta noción es compartida ampliamente por las diferentes corrientes de pensamiento (e.g. neoclásica, marxista, keynesiana) y asumida indistintamente por ortodoxos y heterodoxos como el objetivo fundamental de la disciplina (Sunkel y Paz, 1970) sin prestar mayor atención a sus consecuencias negativas, vistas simplemente como externalidades. Lo más acuciante es que este imperativo del crecimiento ha permeando las más diversas actividades del quehacer humano que, progresivamente, se le subordinan. Fue –y es– tal su influencia, que la prioridad general asignada al crecimiento económico se reconoce como la idea más importante y más difundida del siglo XX (McNeill, 2000).

Su institucionalidad, legada del paradigma tecnoeconómico basado en el uso intensivo de materiales y energía, preserva muchos de sus elementos organizacionales, jurídicos y de conducta, y se cimenta en tres fundamentos indiscutidos globalmente: el Producto Interno Bruto (PIB), creado en Estados Unidos a inicios de los años 30 para desarrollar el sistema de cuentas nacionales,⁶ el libre comercio basado en las ideas de Adam Smith (1994) publicadas en 1776 y la dotación de factores, enunciada en el Teorema de Heckscher-Ohlin que establece que un país basará su intercambio comercial haciendo uso intensivo del o de los factor(es) relativamente más abundantes y baratos (Chacholiades, 1992), con basamento en la teoría de las ventajas comparativas, desarrollada por David Ricardo a inicios del siglo XIX (Mercado y Córdova, 2018). En el ínterin se pasó de la segunda a la quinta revolución industrial que implicó transformaciones tecnológicas que impulsaron la emergencia del paradigma tecnoeconómico basado en el uso intensivo de la información con base en la microelectrónica (Pérez, 2020). Sin embargo, el nuevo paradigma continuó haciendo uso intensivo de materiales y energía, sin lograr un claro desacoplamiento entre el crecimiento económico y el consumo de recursos (Hennicke y Sewerin, 2009), colocando dudas sobre su sustentabilidad.

⁵ Esta influyente idea de Rostow, se fundamentó en la observación de la evolución, en sus etapas tempranas, de algunos sectores, llevando a caracterizar la historia económica como una secuencia de fases de crecimiento, siendo la última la del alto consumo en masa.

⁶ Simon Kuznetz, su creador, reconocía las severas limitaciones del PIB como indicador de desarrollo humano: «el bienestar de una nación puede ser apenas inferido de la medición del ingreso nacional» por lo que debía preguntarse «¿crecimiento de qué y para qué?» (OECD, 2001).

Las transformaciones tecnológicas disruptivas coadyuvan cambios en la dinámica económica, al posibilitar nuevas formas de producción, distribución y consumo, pero no modifican su lógica, que es la del crecimiento. Así, contrariamente a lo planteado por Pérez (2020), con relación a que «la irrupción de las nuevas tecnologías produce desacoplamientos en la esfera tecnoeconómica que inducen la transformación del marco socio-institucional», es éste, con todo su entramado económico, político, jurídico y cognitivo el que, en importante medida, condiciona y orienta las transformaciones tecnológicas. En síntesis, se genera un vasto arsenal de conocimiento e innovaciones en la perspectiva «*business as usual*» (Robinson, 2013) inherente al crecimiento continuo que, si bien modifican los elementos físicos (maquinarias y equipos) y los procesos productivos, inciden poco en sus elementos organizacionales (administrativos, comerciales) legales (regulación y promoción) y los modos –el para qué– de la producción del conocimiento técnico-científico. Esto significa que en el nivel del sistema socio-técnico,⁷ las interacciones entre sus elementos (e.g. artefactos, conocimiento, capital, trabajo, acepción cultural) que permiten el cumplimiento de las funciones societales (e.g. servicios, alimentación, etc.) (Geels, 2004) escasamente han cambiado, estando determinadas profundamente por la lógica del crecimiento económico continuo (figura1).

Los incuestionados fundamentos de la economía señalizan así las pausas del desarrollo, aun cuando los componentes del crecimiento sean un anatema para la sustentabilidad. Las disrupciones tecnológicas posibilitan el surgimiento de nuevas industrias y servicios, así como la revigorización de las existentes, motorizando el crecimiento sostenido del PIB que, en condiciones de amplia liberalización comercial y de alta especulación financiera, tiene impactos socioambientales negativos debido a la creciente demanda de recursos materiales y energéticos –tanto de los asociados al anterior paradigma tecnoeconómico (e.g. hierro, bauxita, cobre, petróleo, gas natural, caliza, etc.) como al nuevo (tierras raras, cobalto, niobio, tántalo, litio)– y a la generación de más desechos peligrosos y emisiones tóxicas (CEC, 2002). A ello, se agrega la distribución desigual de estos impactos, derivada del aprovechamiento de

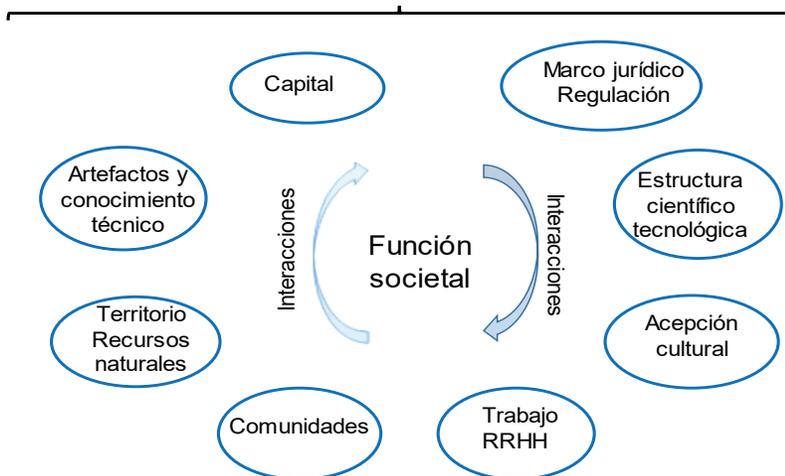
⁷ Según la definición de Geels (2004) son las interacciones entre diferentes elementos económicos, sociales, y culturales –políticos, agregan los autores– necesarios para cumplir funciones societales (e.g. alimentación, transporte, comunicación, salud, etc.). En las sociedades modernas, la tecnología desempeña un papel relevante para el cumplimiento de esas funciones, teniendo las interacciones diversas maneras de configurarse.

la dotación de factores que, por ejemplo, afianza a América Latina como importante proveedor de materias primas, lo que, si bien aumenta el ingreso nacional de algunos de sus países, afecta considerablemente el medio natural, conformando zonas de sacrificio (Díaz Paz *et al.*, 2023).

Figura 1

Elementos integrantes del sistema sociotécnico – determinación económica

Crecimiento económico continuo



Fuente: Geels (2004) adaptado nuestro.

Esta situación, de altísimos costos ambientales y excesivos riesgos tecnológicos, demanda cambios en las formas de producción y el consumo que, concomitantemente, requieren cambios institucionales y políticos para avanzar hacia la sustentabilidad, lo que se ha definido como transición ecológica (García, 2018). Ello requiere de: la transición energética en un escenario de NegaWatt (potencia ahorrada mediante la eficiencia energética y el uso de energías renovables),⁸ la transición industrial en la perspectiva de la economía circular y la preservación de la biodiversidad (Etres, 2016). Pero vista la consolidación de la trayectoria tecno-económica prevaleciente y sus consecuencias socio-ambientales, es pertinente interrogarse si efectivamente se esté avanzando hacia esos requerimientos.

⁸ <https://negawatt.org/The-negaWatt-2050-energy-scenario>

García (2018) señala que la transición ecológica debe darse sin alterar sustancialmente la organización de las actividades económicas, en tanto que Rotondo *et al.* (2022) la definen como «el proceso de innovación tecnológica para lograr el cambio en nuestra sociedad, considerando el cumplimiento de los criterios de sostenibilidad ambiental». Soslayan, sin embargo, que gran parte del esfuerzo innovador se orienta a producir y consumir bienes no esenciales, haciendo un uso excesivo de materiales y energía, propiciando el despilfarro, lo que no entra en conflicto con las exigencias del crecimiento.

Algunas de las innovaciones en las tecnologías de la información y la comunicación (TICs) y los productos que generan, son interesante ejemplo de ello. La tecnología de *Blockchain* posibilitó el desarrollo del Bitcoin, creando el espacio para las criptomonedas, que constituyen un sistema financiero paralelo que reduce la efectividad de la regulación y la intermediación financiera, restringiendo la política monetaria (Hacibedel y Perez-Saiz, 2023). Shin y Rice (2022) ven un alcance mayor, señalando que las criptomonedas constituyen un nuevo sistema sociotécnico, visto incluso, como clave para generar nuevos motores de crecimiento al tener la posibilidad de contribuir con el financiamiento a largo plazo de la economía mundial (Muraviov *et al.*, 2023). No obstante, este sistema es principalmente autorreferencial, no financia actividad alguna en la economía real, siendo usado fundamentalmente con fines especulativos (Bank for International Settlements, 2023), lo que confirma Joseph Stiglitz al señalar que el Bitcoin no cumple «ninguna función socialmente útil».⁹

Aparte de los cuestionamientos sobre los fines de esta tecnología, incluso sobre su utilización creciente para actividades ilícitas,¹⁰ subyace su impacto ambiental. El consumo de electricidad asociado a la minería de Bitcoin registró en 2023 un promedio de 120 TWh, duplicándose el consumo total respecto a 2022 y constituyendo entre un 0,2 por ciento a 0,9 por ciento de la demanda global de electricidad, equivalente al consumo de Australia.¹¹ Situación similar se observa en el crecimiento de la inteligencia artificial (IA) frente a la cual las preocupaciones sobre sus impactos ambientales pasan a segundo plano al constatare la seria amenaza que supone para la democracia e, incluso, para

⁹ <https://www.weforum.org/agenda/2017/11/joseph-stiglitz-bitcoin-ought-to-be-outlawed/>

¹⁰ <https://knowledgehub.transparency.org/helpdesk/criptocurrencies-corruption-and-organised-crime-implications-of-the-growing-use-of-cryptocurrencies-in-enabling-illicit-finance-and-corruption>

¹¹ <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=61364>

la autonomía y la vida de los seres humanos.¹² Así mismo, la IA se revela como una actividad altamente demandante de energía, al punto que, dentro de poco, superará el consumo de todos los vehículos eléctricos juntos.¹³ Para tener una idea de la dimensión de esta cantidad, en 2022 el consumo de esta actividad fue de 210 TWh (Bloomberg, 2023).

Adicionalmente, estas tecnologías presentan una huella hídrica muy alta. El consumo de agua de Google, Microsoft y Meta en 2022 fue de 2,2 mil millones de metros cúbicos considerando el uso directo en sus instalaciones (alcance 1) e indirecto (alcance 2), cifra que equivale al doble del consumo de Dinamarca (Li *et al.*, 2023). Pero, incluso, se cuestiona la escasa consideración de elementos socioambientales en sus proyectos que, en algunos casos, se adelantan sin tomar en cuenta la disponibilidad del recurso para requerimientos esenciales de otros actores sociales. Por ejemplo, en mayo de 2024, la justicia chilena paralizó la construcción de un centro de datos para IA de Google, pues consumiría 7.6 millones de litros de agua potable diario para enfriamiento; esto en una región del país que ha sido seriamente afectada por sequías en los últimos 15 años.¹⁴

Crecimiento económico, consumo de energía y explotación de otros recursos

Entre 2000 y 2022, la economía global creció algo más del 85 por ciento (gráfico 1). En ese periodo, continuó aumentando el peso de la economía financiera respecto a la economía real. Concurrentemente, aumentaron los flujos de capital financiero especulativo que, demostradamente, tiene consecuencias socioambientales negativas, especialmente en los países de menores ingresos (Ogada 2023; Belo Moreira y Gerry, 2003).

Históricamente, el crecimiento económico ha requerido de un correspondiente consumo de energía, generando importante degradación ambiental. Recientemente se aduce que para mantener la prosperidad económica se requiere de un sistema energético alineado con los objetivos del desarrollo sustentable (ODS) a fin de generar desarrollo económico con menor dependencia energética (Guo *et al.*, 2021). Para lograrlo, debe

¹² Harry de Quetteville (2023). Entrevista Yuval Noah Harari: 'I don't know if humans can survive AI'. <https://www.telegraph.co.uk/news/2023/04/23/yuval-noah-harari-i-dont-know-if-humans-can-survive-ai/>

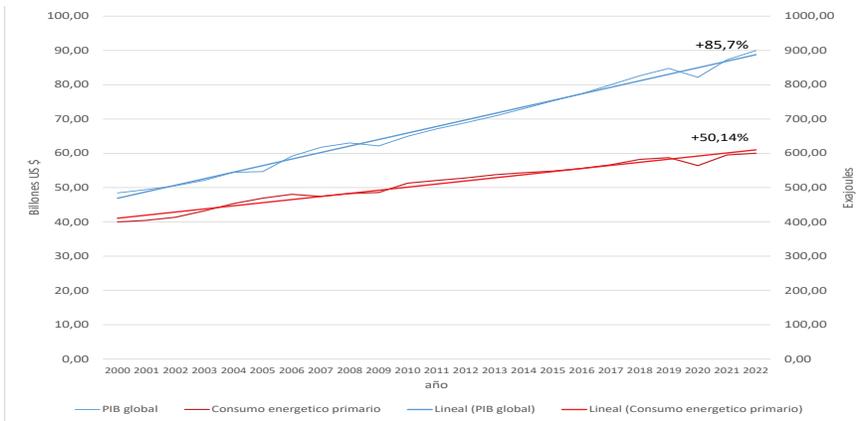
¹³ <https://www.wsj.com/tech/ai/ai-energy-consumption-fc79d94f>

¹⁴ <https://www.canal26.com/planeta/la-justicia-chilena-freno-un-proyecto-de-inteligencia-artificial-debido-a-su-impacto-medioambiental--373664>

desacoplarse el crecimiento de la economía respecto al uso de energía –de manera más general del consumo de recursos– para lo cual la innovación tecnológica juega un papel clave para incrementar la eficiencia energética (Fettweis *et al.*, 2008), e impulsar la transición energética (IEA, 2019).

Gráfico 1

Variaciones del PIB y consumo energético primario globales



Fuente: elaboración propia a partir de WB (varios años) y BP (varios años).

Sin embargo, una revisión del crecimiento económico y del consumo primario de energía desde inicios de siglo –cabe recordar que ya en la Cumbre Mundial sobre el Desarrollo Sostenible de Johannesburgo (2002) se planteó concretamente mejorar la eficiencia energética y la transición a sistemas energéticos limpios (Najam y Cleveland, 2003)– evidencia apenas un desacoplamiento relativo entre ambos. Entre 2000 y 2022, el PIB experimentó un incremento de 85,7 por ciento en tanto que el consumo primario de energía de 50,14 por ciento, con un crecimiento medio acumulado de 2,72 y 1,81 por ciento respectivamente. En el gráfico 1, se aprecia que las pendientes de las líneas de tendencia no presentan diferencias significativas, evidenciando que, a pesar de las mejoras en la intensidad energética en algunas regiones, el actual ritmo de crecimiento del PIB global se sustenta en un aumento absoluto del consumo energético.

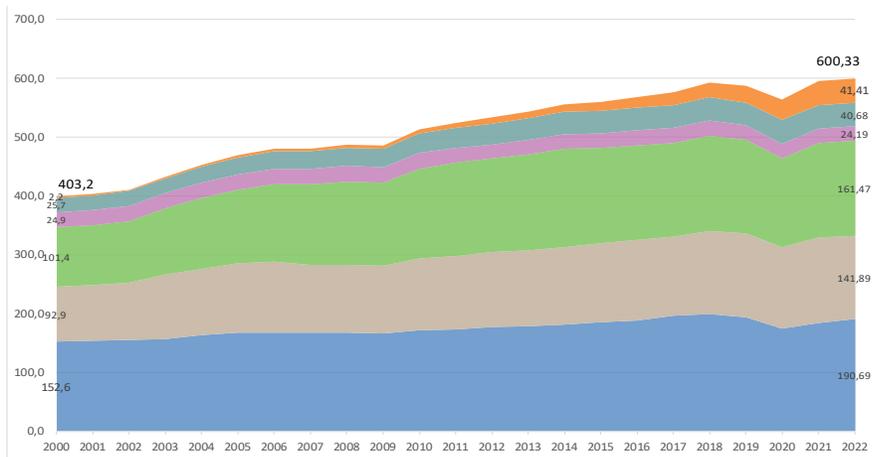
Estos resultados solapan, además, disparidades regionales. Estudios en los países desarrollados (PD) comprueban un desacoplamiento resultante de la introducción de cambios estructurales en las actividades económicas y una

disminución de la intensidad energética. Sin embargo, parte de esto se debe a la desindustrialización y tercerización de actividades energo-intensivas, por lo que, si la contabilidad general incluyese la energía utilizada en la producción de bienes y servicios importados, en muchos casos de países que no prestan atención a la eficiencia energética y al impacto ambiental de sus actividades, se probaría que el desacoplamiento es más virtual que real (Moreau y Vuille, 2018).

Un análisis por tipo de energía muestra que las alternas registraron un notable incremento en el consumo primario global (510 por ciento), aun así, su participación en el consumo total en 2022 alcanzó apenas el 7 por ciento. Este incremento fue seguido, aunque de lejos, por la hidroelectricidad (+22,7 por ciento), que mantiene su participación en torno al 6,5 por ciento, y el gas natural, considerado clave para la transición energética por generar menos emisiones por unidad de energía producida que los otros fósiles (16,2 por ciento). El consumo de petróleo se incrementó cerca de 11 por ciento, manteniendo la contribución mayoritaria al consumo global (31,8 por ciento), seguido de cerca por el carbón, que, si bien registró un aumento de 6,8 por ciento, su contribución al consumo global fue de 27 por ciento. La única fuente que decreció en este período fue la nuclear (-9,6 por ciento) debido al fin de su uso en Alemania, que apagó su última central nuclear en 2023 (gráfico 2).

Gráfico 2

Consumo primario de energía por tipo (exajoules)



Fuente: BP varios años.

Tendencias en el consumo para 2050

El acuerdo de París propuso alcanzar la neutralidad de carbono para 2050. Se convino reducir emisiones para la segunda mitad de este siglo, a objeto de equilibrar aquellas generadas por las actividades antrópicas con las absorbidas por los sumideros de GEI. Esto supondría cambios radicales en el consumo energético. Recientes proyecciones de la Agencia Internacional de Energía (EIA) plantean tres escenarios para 2050 cuya probabilidad de ocurrencia dependerá fundamentalmente del cumplimiento de las medidas adoptadas para afrontar el cambio climático.

Cuadro 1

Escenarios de consumo energético proyectados por la IEA para 2050

Escenario de políticas declaradas (STEPS) (Exajoules)								
	Proyección de consumo			%			TMCA (%) respecto a	
	2022	2030	2050	2022	2030	2050	2030	2050
Renovables	75	120	227	11,90%	17,99%	31,40%	3,00%	3,90%
Biomasa tradicional	24	19	16	3,81%	2,85%	2,21%	-1,00%	-1,39%
Nuclear	29	37	48	4,60%	5,55%	6,64%	1,37%	1,75%
Gas natural	145	149	145	23,02%	22,34%	20,06%	0,00%	0,00%
Petróleo	187	195	186	29,68%	29,24%	25,73%	0,00%	-2,00%
Carbón	170	147	101	26,98%	22,04%	13,97%	-1,19%	-1,78%
Suministro total de energía	630	667	723	100%	100%	100%	0,32%	0,48%
Escenario de promesas anunciadas ((Exajoules)								
	Proyección de consumo			%			TMCA (%) respecto a	
Year	2022	2030	2050	2022	2030	2050	2030	2050
Renovables	75	142	327	13,91%	23,13%	53,52%	4,17%	5,21%
Biomasa tradicional	24	8	5	4,45%	1,30%	0,82%	-4,67%	-5,27%
Nuclear	29	38	59	5,38%	6,19%	9,66%	2,03%	2,48%
Gas natural	145	133	84	26,90%	21,66%	13,75%	-1,14%	-1,86%
Petróleo	187	177	102	34,69%	28,83%	16,69%	-1,17%	-2,07%
Carbón	170	131	34	31,54%	21,34%	5,56%	-2,78%	-5,40%
Suministro total de energía	630	629	611	100%	100%	100%	-0,08%	-0,11%
Escenario cero emisiones (Exajoules)								
	Proyección de consumo			%			TMCA (%) respecto a	
	2022	2030	2050	2022	2030	2050	2030	2050
Renovables	75	166	385	11,90%	29,07%	71,16%	4,97%	5,80%
Biomasa tradicional	24	0	0	3,81%	0,00%	0,00%	NA	NA
Nuclear	29	43	67	4,60%	7,53%	12,38%	2,71%	2,93%
Gas natural	145	119	32	23,02%	20,84%	5,91%	-3,41%	-5,08%
Petróleo	187	148	42	29,68%	25,92%	7,76%	-2,93%	-5,02%
Carbón	170	95	15	26,98%	16,64%	2,77%	-6,27%	-8,03%
Suministro total de energía	630	571	541	100%	100%	100%	-0,61%	-0,52%

Fuente: elaboración propia a partir de IEA-a 2023.

El bajo cumplimiento de los tratados internacionales en la materia por la mayoría de los países, evidenciado en el fracaso en recortar emisiones, coloca dudas en que se alcance la neutralidad de carbono para 2050 (UNEP, 2023 a). De esta forma, los escenarios más probables serían, en primer lugar, el de políticas declaradas, en el que se establece una trayectoria del sistema energético fundamentada en el cumplimiento de las políticas actuales. Se estima una tasa de crecimiento medio del consumo (TMCA) de energía de 0,48 por ciento con un moderado decrecimiento en la tasa de las energías fósiles (la producción de gas natural se mantiene igual y la de petróleo y carbón disminuye alrededor del 2 por ciento) (IEA, 2023). Las energías alternativas, registrarán un aumento significativo (tasa media de crecimiento anual cercana al 4 por ciento) seguida de la nuclear con 1,75 por ciento (cuadro 1).

En segundo lugar, el escenario de promesas anunciadas, en el que la trayectoria del sistema energético se basa en que los países cumplirán totalmente y a tiempo los compromisos ya asumidos, específicamente las Contribuciones Determinadas a Nivel Nacional (CDN) y los objetivos de cero emisiones netas a largo plazo. Se produciría un leve decrecimiento del consumo total de energía (-0,11 por ciento) que conlleva un decrecimiento progresivo de la producción de gas natural y petróleo (en torno del 2 por ciento), y significativo del carbón, cercana al 5,5 por ciento (cuadro 1). Se acentúa, en este caso, el crecimiento de las energías renovables (5,5 por ciento), lo que supondrá enormes proyectos de producción de equipos y desarrollo de infraestructura para la generación y almacenamiento. Algo similar, aunque en menor porcentaje, ocurre con la energía nuclear (2,48 por ciento). En esta última debe acotarse que frente a la presión por disminuir las emisiones de GEI y un relajamiento de las preocupaciones y alertas sobre los riesgos de la energía nuclear, globalmente se observa un aumento sustancial de nuevos proyectos que ampliarán notablemente la disponibilidad de energía,¹⁵ pudiendo estimular alzas en el consumo.

Uso de otros recursos minerales

El creciente aumento de las energías alternativas ha impulsado una inusitada demanda de los denominados «minerales críticos para una transición energética limpia» durante este siglo (cuadro 2). Entre sus principales aplicaciones está la

¹⁵ <https://world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/plans-for-new-reactors-worldwide>

fabricación de baterías de almacenamiento, turbinas eólicas, paneles solares, multiplicidad de equipos electrónicos y vehículos eléctricos; productos y procesos que presentan una alta intensidad tecnológica (IEA, 2022).

Cuadro 2

Tasa media anual de crecimiento - PIB global y minerales críticos para la transición energética limpia (2000-2022)

PIB Global	2,72 %
Producción Aluminio primario	4,48 %
Producción Cobre	2,37 %
Producción Litio equivalente	11,30 %
Producción Níquel	4,36 %
Producción Cobalto	7,14 %
Producción Óxidos de tierras raras	5,64 %

Fuente: elaboración propia a partir de BGS varios años y <https://data.worldbank.org/indicator/NY.GDP.MKTP.KD>.

Entre 2000 y 2022, con excepción del cobre que registró una tasa de crecimiento similar a la del PIB global, el crecimiento de la producción de estos minerales ha sido muy superior al de la economía. El aluminio y el níquel alrededor de un 60 por ciento más, tierras raras 105 por ciento, cobalto 160 por ciento y litio un extraordinario 405 por ciento. El continuo aumento de la demanda generará una brecha importante respecto a la producción para 2030, estimándose crítica para el cobalto, el cobre, el níquel y el litio (Zero Carbon Analytics, 2023). El notable crecimiento que se proyecta para la producción de hidrógeno verde incrementará sustancialmente la demanda de níquel y otros metales valiosos (circonio y platino) (IEA, 2022).

Proyecciones de la demanda sugieren que, en el escenario factible de políticas declaradas, la demanda de estos minerales se duplicará para 2040, registrándose una notable expansión de la frontera extractivista, lo que agudizará la presión sobre los recursos naturales. Esta tendencia se acentúa al moverse hacia el escenario de cero emisiones, en el que se proyecta la cuadruplicación de la demanda (IEA, 2022). Esto ha inducido un aumento notable de las actividades de prospección minera en diversas regiones del planeta, incluso en los océanos, donde se ha comprobado la existencia de grandes cantidades de cobre, níquel, aluminio, manganeso, zinc, plata, oro,

cobalto y metales de tierras raras (Unece, 2024). Su explotación parece indefinible; de hecho, en muy corto plazo, Noruega, país con el cuarto PIB per cápita más alto del mundo y que probada y sobradamente tiene garantizada su seguridad energética, aprobó dar inicio a la explotación del fondo marino, sin que se hayan realizado estimaciones precisas del impacto ambiental que ello acarreará.¹⁶

Como conclusión previa, tomando en cuenta que la tasa de crecimiento del consumo energético global registra apenas un desacoplamiento relativo del crecimiento del PIB global y que la de la explotación de recursos minerales empleados para el desarrollo de las energías alternas es y será muy superior hasta 2040, economía y energía continúan estrechamente acopladas. Si a esto agregamos que el ritmo de uso de energías fósiles se ubica en niveles que atenuarán poco el calentamiento global, difícilmente pueda sostenerse que haya avances hacia la transición ecológica.

La insustentabilidad de la matriz energética convencional

Al observar el crecimiento del PIB global (85,7 por ciento) y de la generación de emisiones de CO₂ (52,7 por ciento) en lo que va de siglo, se determina apenas un desacoplamiento relativo entre ambas variables (gráfico 2). El imperativo de aminorar el calentamiento global requiere un desacoplamiento absoluto que pasa por una drástica disminución de las emisiones, técnicamente factible si se logra una reducción considerable del uso de combustibles fósiles y se aumenta significativamente la captura de carbono.

Pero la evolución y las proyecciones del crecimiento y la composición del consumo de la matriz energética convencional evidencian que no se está reduciendo el consumo de combustibles fósiles, a pesar del gran crecimiento que experimentan las energías alternas que generan problemas socio-ambientales adicionales. Indiscutiblemente, éstas continúan preservando un perfil de generación y consumo intensivo (gráfico 2). Ello ha llevado a la Unión Europea (UE) y a Estados Unidos a adoptar regulaciones más estrictas de emisiones para contener la demanda de combustibles fósiles.

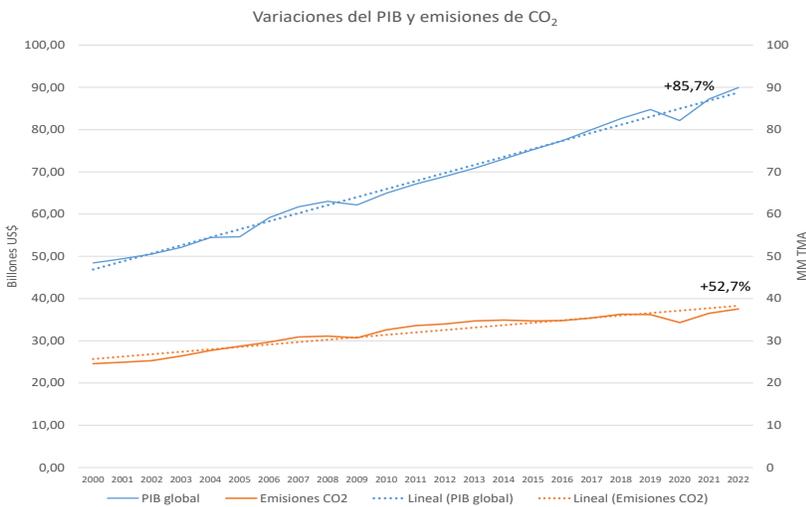
En 2023, el Consejo Europeo aprobó nuevas regulaciones de emisiones de CO₂ para vehículos pesados y medios, a objeto de lograr un 45 por ciento de reducción de emisiones a partir de 2030, 65 por ciento a partir 2035 y 90

¹⁶ <https://www.bbc.com/mundo/articulos/ce5jpnrepp4o>

por ciento a partir de 2040.¹⁷ La Agencia de Protección Ambiental (EPA) de Estados Unidos aprobó ese año estándares de emisiones para este tipo de vehículos fabricados a partir de 2027 a objeto de lograr una reducción de 56 por ciento para 2032 (EPA, 2023).

Gráfico 2

Variaciones del PIB y emisiones de CO₂



Fuente: elaboración propia a partir de WB, EIA (varios años).

Pero del lado de la oferta, algunas de las mayores transnacionales de combustibles fósiles están planificando e implementando proyectos de extracción de petróleo y gas tipo «Bomba de Carbono» –denominados así aquellos que generarán más de una gigatonelada de CO (1GtCO) durante su vida útil– que ampliarán la producción de manera importante. En Estados Unidos, Australia y Canadá, países que han adquirido compromisos importantes en el marco del acuerdo de París, se ubican algunos de los mayores planes de expansión y el mayor número de proyectos de bombas de carbono.¹⁸ A ello, se agregan planes de algunos grandes productores (países) de Oriente Medio

¹⁷ <https://www.consilium.europa.eu/en/press/press-releases/2023/10/16/council-agrees-on-new-rules-to-strengthen-co2-emission-standards-for-heavy-duty-vehicles/>

¹⁸ <https://www.theguardian.com/environment/ng-interactive/2022/may/11/fossil-fuel-carbon-bombs-climate-breakdown-oil-gas>

para impulsar la demanda de estos combustibles en países en desarrollo (PED) que, en general, presentan matrices energéticas convencionales deficientes y a los que, por su exigua capacidad económica, les resulta difícil la transición a otras energías en la perspectiva «*bussines as usual*». ¹⁹ Es probable que esto ralentice sus compromisos de disminución de emisiones, acarreando consecuencias globales adversas.

Escenarios del calentamiento global

La reestimación en 2022 de las metas de reducción de emisiones de GEI del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC en el original inglés) para contener el calentamiento global en 1,5°C por encima de la temperatura de la era preindustrial determina que las emisiones deben disminuir 42 por ciento para 2030 (respecto a 2010) y que debe alcanzarse la neutralidad de carbono para mediados de siglo (UNEP, 2023a). Se advierte que, aunque estas metas se alcanzaran, los impactos afectarían notablemente a porciones importantes de la humanidad debido a la agudización de fenómenos climáticos extremos (e.g sequías, inundaciones, huracanes), al incremento que se produciría de la pérdida de diversidad animal y vegetal, y se amenazaría la seguridad alimentaria debido a una disminución del rendimiento de los cultivos agrícolas en las zonas tropicales.

Sin vislumbrarse cambios en el patrón de desarrollo asociado al crecimiento continuo y considerando el escaso compromiso de la mayoría de los países con la Convención Marco sobre el Cambio Climático del Convenio de París, se proyecta que para 2030 las emisiones se reducirán apenas 9 por ciento en el supuesto –casi negado– de que todos los países cumplieran plenamente con los objetivos asumidos en las CDN (escenario de políticas declaradas). La disminución anual de emisiones antrópicas de CO₂ sería 0,5 gigatoneladas para 2030 y 1,9 gigatoneladas para 2050. Esta última representa apenas el 37 por ciento de lo requerido para cumplir con el escenario de 1,5°C, lo que incrementaría la temperatura entre 2,5°C y 2,9°C por encima de la temperatura de la era preindustrial (UNEP, 2023a).

Estos valores están muy por encima de los 2°C del considerado escenario «límite» de calentamiento global, en el cual aún sería posible estabilizar el clima, pero con una agudización tremenda de los impactos ambientales y

¹⁹ <https://www.theguardian.com/environment/2023/nov/27/revealed-saudi-arabia-plan-poor-countries-oil>

sociales (Levin y Tirpak, 2018). Estos datos sustentan la tesis de que con el actual enfoque geopolítico dado a las emisiones de GEI, limitado apenas a reducir emisiones e implementar métodos de extracción y captura del CO₂ no probados, el calentamiento global superará los 1,5°C en la presente década y los 2°C antes de 2050 (Hansen y otros, 2023).

Impactos de las energías alternas

El rápido crecimiento que experimentan las energías alternas, en especial para la producción de electricidad, está incrementando sustancialmente la demanda de los minerales críticos para la «transición energética limpia» reimpulsando la minería. De hecho, esta transición implica cambiar la dependencia de los combustibles fósiles por la de los metales y minerales (Ericsson, 2023). Esta actividad, a pesar de los intentos para mejorar su imagen, comunicando prácticas más eficientes y disminución de impactos –que se ha dado en llamar «minería sustentable» cuestionada en muchos casos por involucrar estrategias de *«greenwashing»* (Maggiore y Mattheus, 2023)– es reconocida por sus impactos socioambientales negativos, distribuidos globalmente de forma muy desigual. Económicamente, es un sector altamente concentrado; en un universo estimado de veinticinco mil empresas, trescientas gigantes dan cuenta del 70 por ciento de la producción y, de éstas últimas, apenas diez responden por el 30 por ciento (Ericsson, 2023). Así, los beneficios se distribuyen también de manera muy inequitativa.

Se han identificado impactos asociados a la explotación y uso de los minerales críticos de la transición energética. Paradójicamente, desde el punto de vista ambiental, se advierte su contribución alta al cambio climático, derivado de las emisiones de GEI asociados a las actividades de extracción, que se incrementarán por la sostenida demanda. Adicionalmente, producen impactos en la cobertura del suelo, generando erosión, pérdida de hábitats, afectando la biota y aumentando el riesgo de extinción de algunas especies. Tan o más grave es el impacto sobre los recursos hídricos tanto en su disponibilidad, ya que es una actividad que consume gran cantidad del recurso, como en su afectación, debido a la contaminación de cursos de agua y reservorios, consecuencia del drenaje de sustancias peligrosas, desechos de relaves y aguas residuales (cuadro 3).

La extracción del litio conlleva muchos de estos impactos. Se estima que el 52 por ciento de las explotaciones del mineral a nivel global se ubican en

áreas de alto estrés hídrico (UNEP, 2023b),²⁰ la mayoría ubicadas en América del Sur, subcontinente que concentra el 53 por ciento de las reservas globales probadas del metal, que para 2023 alcanzaba las 23,2 MMTM, y el 59 por ciento del total de las estimadas (81 MMTM). El metal se encuentra disuelto en salmueras subterráneas en zonas desérticas a gran altitud en el denominado Triángulo del Litio (Argentina, Bolivia y Chile). Estas salmueras se bombean a grandes piscinas a cielo abierto en las que mediante técnicas evaporíticas se concentran y se precipitan adicionando carbonato de sodio o hidróxido de calcio, según la sal de litio que se quiera precipitar. Posteriormente, se purifican usando grandes cantidades de agua dulce, proceso que genera importantes volúmenes de desechos (Romeo, 2019). Se conforman, así, zonas de sacrificio (Díaz Paz *et al.*, 2023).

Cuadro 3

Algunos impactos y riesgos ambientales y sociales asociados a la producción de minerales críticos de la transición energética

A m b i e n t a l	Cambio climático	Intensidad de emisión de GEI mayores que los metales a granel. Fuente importante de emisiones a medida que aumenta la demanda. Cambios en los patrones de demanda y de los tipos de recursos destinados a la transición energética presionan al aumento de emisiones de GEI.
	Uso de la tierra	Cambios importantes en la cobertura del suelo con impactos adversos sobre la biodiversidad. Cambios en el uso del suelo pueden provocar el desplazamiento de comunidades y la pérdida de hábitats de especies en peligro de extinción.
	Gestión del agua	La extracción y el procesamiento de minerales requieren gran cantidad de agua. Riesgos de contaminación por drenajes de ácidos, descarga de aguas residuales y el descarte de relaves. Competencia en el uso del agua para la explotación de los recursos minerales en áreas de alto estrés hídrico.
	Desechos y residuos	La disminución de la calidad del mineral puede provocar un aumento importante de los residuos mineros (e.g. relaves y rocas estériles); riesgo de desastres ambientales por deficiente infraestructura. La extracción y el procesamiento de minerales generan desechos peligrosos (e.g. metales pesados, material radiactivo).

²⁰ Situación similar se observa en el caso del cobre, en las que 51% de las minas se encuentra en zonas de alto estrés hídrico (UNEP, 2023).

S o c i a l	Seguridad y salud	Malas condiciones laborales y peligros en el lugar de trabajo (e.g. accidentes, exposición a productos químicos tóxicos). Carencia de condiciones mínimas de seguridad de los trabajadores de la minería artesanal y de pequeña escala.
	Derechos humanos	Impactos adversos en la población local (e.g. trabajo infantil o trabajo forzoso). Los cambios en la comunidad asociados con la minería también pueden tener un impacto desigual en las mujeres.

Fuente: IEA, 2022.

Evaluaciones en el salar de Atacama en Chile determinaron una afectación importante en el sistema hídrico de la región. Superficialmente, los espejos de agua de los espacios lacustres disminuyeron y se observó afectación de la flora. La alta demanda de agua ha causado la sobreexplotación de acuíferos, constatándose usos intensivos de aguas subterráneas por parte de las empresas mineras que superaron la capacidad de recarga de la cuenca generando estrés hídrico (Díaz Paz *et al.*, 2023). Estudios en Bolivia destacan que, en las zonas de explotación del litio, la capacidad de recarga es casi inexistente, por lo que las aguas subterráneas, acumuladas por regímenes de precipitación ocurridos entre 90 y 19.000 años antes, no serían recursos renovables (Molina Carpio, según Romeo, 2018).

En cuanto a disposición de desechos un caso ilustrativo es el del lago artificial de Baotou en Mongolia, un vertedero de descargas líquidas con importantes concentraciones de productos químicos utilizados para la extracción y procesamiento de óxidos de tierras raras reconocido como uno de los lugares más contaminados del planeta (Asian Development Bank, 2016).

Socialmente, la extracción de algunos de estos minerales tiene impactos considerables. En el caso del litio, afectan formas de vida de las comunidades aledañas a los salares. En los tres países del Triángulo del Litio ha disminuido la disponibilidad de agua para el pastoreo y la agricultura perjudicando, también, algunas actividades turísticas (Romeo, 2019). El cobalto presenta también impactos alarmantes. La República Democrática del Congo (RDC), el principal productor mundial de cobalto (58,6 por ciento de la producción global) (WMP, 2023) experimenta los efectos negativos –violación de derechos humanos– tanto de la explotación informal, que responde por alrededor del 20 por ciento de la producción, como de la minería industrial. En el primer caso, según informes de la Unicef unos 40.000 niños trabajan en minas en el sur de este país, la mayoría de cobalto, en condiciones precarias y de

alto riesgo sin contar con algún equipo adecuado para prevenir daños a la salud, llegando en ocasiones a trabajar hasta 20 horas y percibiendo, apenas, un salario de dos dólares al día.²¹ En el segundo caso se ha reportado el desplazamiento de comunidades, incluso de forma violenta, y la eliminación de tierras de cultivo (Amnistía Internacional, 2023).

No menos alarmante es la extracción del coltán, mineral que contiene los elementos tántalo y niobio, importantes en la industria electrónica y energética. El tántalo, es imprescindible para la fabricación de condensadores, dispositivos para el almacenamiento de energía en artefactos electrónicos portátiles (computadores, teléfonos celulares, tabletas, etc.) en tanto que el niobio para la construcción de turbinas eólicas y bobinas superconductoras. Su escasa disponibilidad en la corteza terrestre, concentrada en zonas de alta inestabilidad política, hacen que sea calificado como elemento crítico por la UE.²²

La RDC, el mayor productor mundial de coltán, responde por dos tercios de la producción mundial estimada en 3.780 TMA, y por el 49 por ciento de la producción mundial de tántalo, estimada en 1.500 TMA (WMP, 2023). Su explotación, que por la escala se ha realizado de manera artesanal, recientemente está pasando a ser controlada por empresas internacionales. Esta actividad no sólo acarrea importantes impactos sociales y ambientales, sino que está signada por conflictos geopolíticos con graves consecuencias sobre los derechos humanos.

Los yacimientos de coltán de la RDC se encuentran en la frontera con Ruanda, país que ha incrementado su extracción, alcanzando el 30 por ciento de la producción mundial. Las tensiones entre ambos países han aumentado por dudas sobre la procedencia de la producción de Ruanda ante la ausencia de trazabilidad y el crecimiento del contrabando. Incluso, Ruanda reconoce ser un puente para el contrabando de minerales de la RDC, contando con participación de grupos armados irregulares, agravando la violación de derechos humanos y la violencia en la frontera. La RDC sostiene que esto cuenta con la complicidad de la comunidad internacional, generando distorsiones en la cadena global de suministro (Goldblatt, 2023).

²¹ Amnistía Internacional. https://redescuelas.es.amnesty.org/fileadmin/redescuelas/Recursos_educativos/_Trabajo_Infantil_breviario_explicativo.pdf

²² <https://www.uab.cat/web/detalle-noticia/tantalo-historia-de-un-recurso-limitado-1345680342040.html?noticiaid=1345852499721>

En Venezuela se presenta una situación similar. En 2017, contraviniendo la legislación ambiental, el gobierno aprobó la creación la Zona de Desarrollo Estratégico Nacional Arco Minero del Orinoco, que abarca una superficie de 112.000 Km². Bajo esta figura se conformó una estructura poco transparente para explotar minerales preciosos e industriales, entre ellos Coltán, que involucra a oficiales de la fuerza armada e incorpora empresas estatales, privadas nacionales y extranjeras y grupos irregulares (hampa común y grupos guerrilleros). La explotación se realiza a cielo abierto, de forma rudimentaria, por miembros de comunidades pobres, incluida población infantil, sometidas a explotación en condiciones precarias de seguridad, generando importante impacto ambiental. La inserción en la cadena global de suministro se realiza mayoritariamente mediante el contrabando (SOS Orinoco, 2020).

Estas experiencias evidencian que la realidad de la minería dista de ser sustentable, multiplicándose vertiginosamente para satisfacer la vasta demanda de minerales requeridos para avanzar hacia la «transición energética limpia». En las nuevas industrias asociadas a este proceso, insertas en la lógica del crecimiento continuo, parece repararse poco en las condiciones de explotación de los recursos naturales y sus impactos sobre el ambiente y la vida de muchos seres humanos –ciertamente considerados actores nada relevantes– y otras especies vivas, aspectos que, de manera general, no suelen ser tomados en cuenta en el *main stream* de los estudios sobre los cambios en los sistemas tecnológicos, ni en los elementos y las interacciones de los sistemas socio-técnicos.

Los resultados indican que, aun cuando hay un desarrollo disruptivo de las energías alternas con gran aumento en su producción y consumo, no hay una reducción neta en el uso de combustibles fósiles. Hasta ahora, su contribución ha sido aumentar de manera complementaria la disponibilidad energética total, principalmente como electricidad que, vista como un *commodity*²³ –cuya oferta está altamente concentrada en manos de grandes consorcios– y no como un servicio público, tiende a promover el consumo dispendioso.

²³ Electricity is not a commodity like any other, it is a public service. Entrevista a Jacques Percebois. https://www.lemonde.fr/en/economy/article/2022/09/20/electricity-is-not-a-commodity-like-any-other-it-is-a-public-service_5997667_19.html

¿Transición energética limpia?

Socialmente, se ha instaurado la idea de que la transición energética consiste básicamente en cambiar la matriz energética, sustituyendo los combustibles fósiles por energías renovables, con bajas emisiones de carbono y con criterios de sustentabilidad.²⁴ Ello, sin embargo, no supone alteraciones sustanciales en la intensidad y los ritmos de producción de las actividades económicas y, por tanto, en la cantidad de energía generada, las formas de distribuirla y la intensidad del consumo final. Una consecuencia importante es que se repara poco en la energía desperdiciada. Por ejemplo, estimaciones del *Lawrence Livermore National Laboratory*, de Estados Unidos determinan que la desperdiciada alcanza el 68 por ciento de la energía producida en ese país.²⁵ Modificar esta realidad plantea redefinir la orientación y el alcance de las interacciones en el sistema sociotécnico.

Disrupciones tecnológicas en la energía ¿revolución tecnológica?

Desde hace ya algunos años se constatan innovaciones tecnológicas radicales (Katz, 1976) que pueden impulsar la transición energética. Se desarrollan e implementan en los ámbitos de la producción, distribución, almacenamiento y consumo de la energía, principalmente, con el objetivo de disminuir la dependencia de los combustibles fósiles, abarcando varios de los grandes sistemas tecnológicos (e.g. electricidad, transporte) (Hughes, 1987). Estos sistemas evidencian cambios en sus contribuciones al crecimiento económico, por lo que se infiere que está en marcha una revolución tecnológica.

En la generación se distinguen, por una parte, esfuerzos para mejorar la eficiencia en fuentes convencionales. Por ejemplo, en la hidroeléctrica, mediante el diseño de nuevas turbinas que generan más energía sin aumentar el caudal de agua y el análisis de desempeño utilizando sistemas avanzados de control e inteligencia artificial para aumentar la eficiencia y la seguridad.²⁶ En la nuclear, en avances en las tecnologías de fisión que incluyen el desarrollo de reactores avanzados (reactores modulares y microrreactores) y reactores refrigerados por sales fundidas e innovaciones disruptivas en la fusión nuclear, que presenta ventajas por generar subproductos menos peligrosos (helio)

²⁴ <https://natccc.gov.ng/energy-transition-climate-change/>

²⁵ <https://www.weforum.org/agenda/2018/05/visualizing-u-s-energy-consumption-in-one-chart/>

²⁶ <https://www.enelgreenpower.com/es/historias/articles/2017/06/energia-hidroelectrica-se-renueva-con-iot-y-wireless>

y, en general, no producir residuos altamente reactivos. Sin embargo, falta mucho para diseñar y construir reactores que produzcan energía en escalas que permitan alimentar las redes ²⁷ (cuadro 4).

Cuadro 4

Innovaciones tecnológicas y organizacionales en la matriz energética

		Innovación
Generación	Eficiencia energética	Mejoras y nuevas tecnologías en equipos de generación, digitalización y automatización
	Nuclear	Nuevos reactores de fisión nuclear, desarrollo tecnología de fusión nuclear
	Energía eólica	Diseño de nuevas turbinas más eficientes; masificación Onshore-Offshore de granjas eólicas
	Solar	Nuevas celdas fotovoltaicas más eficientes, masificación granjas solares
	Hidrógeno verde	Tecnologías eficientes de electrólisis de agua
Red Transmisión y distribución	Integración de la red	Convergencia tecnológica en almacenamiento, transmisión y distribución de energía y comunicación y flujo de datos
	Almacenamiento de energía	Tecnologías de baterías con mayor densidad de carga y potencia, nuevas arquitecturas
	Independencia de la red	Tecnologías de generación y almacenamiento flexibles. Producción y distribución a pequeñas escalas. Disrupción del modelo de servicio
Consumo	Iluminación	Tecnología Led
	Transporte	Impulsión eléctrica e hidrógeno
	Producción industrial	Combustión de hidrógeno procesos industriales

Fuente: elaboración propia basada en IEEFA (2018).

Por otra parte, el desarrollo y expansión de las fuentes alternas mediante el diseño de generadores eólicos y paneles solares más eficientes y su difusión mediante la instalación de mega-granjas. Una disrupción con gran potencial de descarbonización en la energía y la industria, es la producción de hidrógeno verde. Importantes esfuerzos de investigación y desarrollo tecnológico en electrólisis se realizan para optimizar el proceso (cuadro 4). De hecho, el desarrollo de electrocatalizadores para electrólisis de agua de mar,

²⁷ <https://www.rff.org/publications/explainers/advanced-nuclear-reactors-101/>

fue el frente de investigación (*hot research front*) que ocupó el primer lugar en el área de química y ciencia de los materiales en el nivel global en 2023 (Clarivate, 2023).

En la transmisión y la distribución se observa en primer lugar una importante convergencia de innovaciones que consideran el almacenamiento de energía como componente fundamental de soporte de la red, esto incluye avances en las tecnologías de baterías, especialmente de litio, y el acoplamiento de estos dispositivos a la red mediante nuevas arquitecturas de sistemas potenciadas por tecnologías de aprendizaje automático, análisis de datos e internet de las cosas. Ello está cambiando la configuración de la red –denominada inteligente– que integra la transmisión y distribución de energía con la comunicación y el flujo de datos,²⁸ conjunción que por su complejidad y sus costos probablemente promoverá la concentración del sistema tecnológico, reproduciendo o preservando las estructuras usuales de los servicios (negocios) energéticos (cuadro 4).

No obstante, algunas de estas tecnologías presentan atributos de flexibilidad que pueden contribuir a promover trayectorias tecnológicas más sostenibles. Esto porque, aunque sean intensivas en conocimiento, no lo son, necesariamente, en capital (e.g. paneles solares, pequeños aerogeneradores, baterías domésticas para almacenamiento), haciendo que las escalas de producción no sean determinantes para su implementación, tornándolas más accesibles a comunidades e, incluso, a hogares (cuadro 4).

Cambios disruptivos son perceptibles en el consumo (cuadro 4). Basta mirar la sustitución de la iluminación incandescente y fluorescente por la iluminación LED, sustancialmente menor consumidora de energía, y el aumento global de las ventas de autos eléctricos, que en 2023 alcanzó 13,9 millones de unidades (15 por ciento del total mundial) más de diez veces la cantidad vendida en 2017 (1,2 millones). En el escenario de políticas declaradas se proyecta que las ventas alcancen 45 millones de unidades en 2035 (IEA, 2024). La sustitución de combustibles fósiles por hidrógeno en procesos térmicos en la industria constituirá uno de los cambios más importantes en tecnología de procesos en este siglo. Las innovaciones apuntan a una sustitución progresiva mediante el uso de quemadores industriales que funcionen con mezclas de gas natural/hidrógeno que oscilen entre 0 y un 100 por ciento de hidrógeno.²⁹

²⁸ <https://www.sap.com/insights/smart-grid-ai-in-energy-technologies.html>

²⁹ <https://www.dnv.com/article/hydrogen-as-a-fuel-for-high-temperature-heating-processes-219385/>

Esta constelación de innovaciones interrelacionadas, que modifican sustancialmente las diferentes actividades relacionadas con la energía y generan crecimiento económico cambiando la contribución de las fuentes, señalizan la ocurrencia de una revolución tecnológica (Pérez, 2020). Sin embargo, cambios en los componentes técnicos e, incluso, de algunos elementos organizacionales del sistema tecnológico no parecen conducir a una transformación de la matriz energética que induzca una transición energética limpia. Esto lleva a reflexionar sobre los cambios, cuáles y en que ámbito, pueden impulsar esta transición, colocando la atención en las interacciones del sistema sociotécnico.

Transición tecnológica - transición sociotécnica

Tecnológicamente, existe la capacidad para superar la dependencia de los combustibles fósiles y lograr una transición energética limpia. Pero vistas las proyecciones de la producción, del consumo de energía y de los minerales críticos para la transición, se comprueba que no se supera esta dependencia y que las vías hacia la construcción de la transición energética distan bastante de ser «limpias». Es perceptible, sí, una transición tecnológica, entendida como los cambios en las formas en que se efectúan diversas funciones sociales dependientes de la energía (e.g. transporte, comunicaciones, producción industrial) que, además de las innovaciones en los artefactos y en los procesos, consideran cambios en la infraestructura, normas y en algunas formas de uso (Van den Ende y Kemp, 1999 según Geels, 2002). Sin embargo, se observan pocos cambios en la intensidad del uso de la energía. Esto se debe a que cambian los componentes y las formas, pero no los fundamentos de la conformación y funcionamiento de los sistemas tecnológicos, que no son otros que los del crecimiento económico continuo. Estos fundamentos condicionan las interacciones de los elementos integrantes del sistema sociotécnico que, a su vez, determinan las dinámicas de los sistemas tecnológicos.

Un caso ilustrativo es el de la electricidad. La tasa media anual de crecimiento de la demanda entre 2023 y 2026 se estima en 3,4 por ciento, muy superior al del PIB global, debido en gran parte al consumo de la inteligencia artificial, las criptomonedas –ambas duplicarán su consumo– y la locomoción eléctrica. La casi totalidad de este aumento en la generación será aportada por las energías renovables, cuya participación pasará de 39 por ciento a cerca del 50 por ciento en dicho período, complementando la participación de los combustibles fósiles en la producción de electricidad (IEA, 2024); esto

no significa que habrá una reducción en su consumo, manteniéndose la generación de emisiones de GEI.

Las demandas crecientes de energía y la necesidad de atenuar sus impactos inducen la innovación tanto en las tecnologías convencionales como en las alternas (cuadro 4) pero, en forma dominante, sobre las mismas lógicas *–business as usual–* en los modos de producción, distribución y consumo de energía. Se diversifican y aumentan los *inputs*. A las fuentes convencionales se adicionan las fuentes alternas y los minerales críticos para la transición energética y aumentan y se diversifican los *outputs* (la cantidad de energía generada, distribuida y consumida), y la contaminación por nuevos desechos. El resultado: una matriz energética insustentable.

En el sistema tecnológico de la electricidad es evidente que, aun cuando se producen innovaciones radicales en las tecnologías convencionales (e.g. el desarrollo de la fisión nuclear) y la incorporación de TICs disruptivas para su control y operación, no se modifican las formas centralizadas de generación y distribución de la energía manteniendo su carácter intensivo en capital, con altas escalas de producción. Al no haber cambios estimables en los *inputs* y los *outputs* no es verificable una transición tecnológica (figura 2).

Como se indicó, un atributo importante de algunas tecnologías asociadas a la generación de energías alternas es la flexibilidad que hace posible su implementación con independencia de la escala; ello permitiría introducir cambios disruptivos en la estructura de la matriz energética con base en fuentes diferentes de las convencionales, pero también preservar las existentes. En ambos casos, es evidente la ocurrencia de la transición tecnológica. No ocurre lo mismo si se alude a una transición sociotécnica.

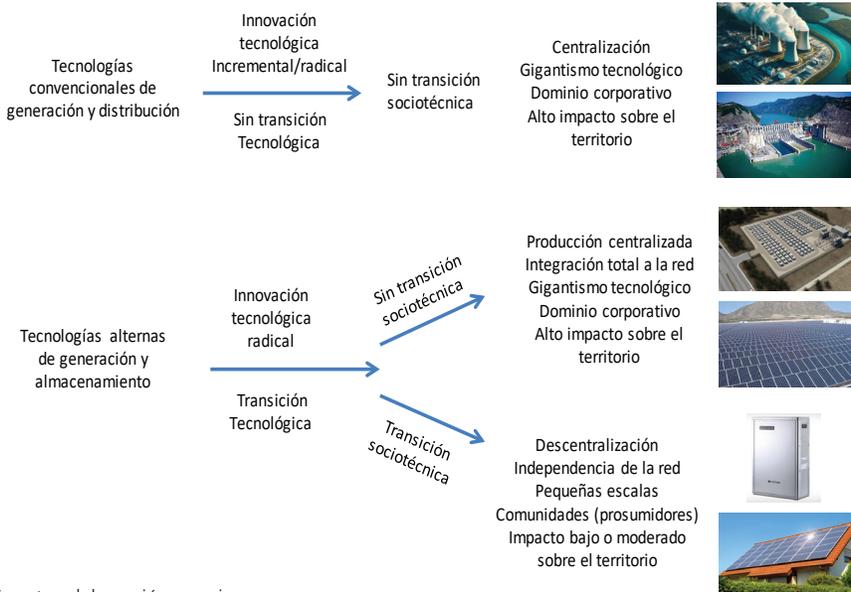
La tendencia dominante en la introducción de las tecnologías alternas es implementar grandes proyectos que se integran a los sistemas centralizados en aras de complementar el creciente suministro de energía. Alcanza con ver dos ejemplos: en California a inicios de 2024 entró en operaciones el proyecto *Edwards & Sanborn Solar + Energy Storage*, el más grande de Estados Unidos, que en una superficie de 1.900 hectáreas alberga 1.900.000 paneles solares y 120.720 baterías para almacenamiento para generar 1,2 GW de energía.³⁰ A mediados de ese año, en la Provincia de Xinjiang en China, entró en operación la granja solar más grande construida hasta ahora.

³⁰ <https://www.mortenson.com/projects/edwards-sanborn-solar-plus-storage>

Sobre una superficie de 13.000 hectáreas se generarán 6 GW de energía.³¹ Constituyen desarrollos basados en innovaciones tecnológicas radicales, que introducen nuevos elementos físicos (maquinarias y equipos) y transforman los procesos, pero concebidos sobre las lógicas de producción y consumo convencionales (elementos comerciales, administrativos, legales y de organización de la producción de conocimiento heredados del paradigma intensivo en uso de materiales y energía. En consecuencia, pierden el carácter disruptivo porque, aun constituyendo una clara transición tecnológica, no promueven la transición sociotécnica (figura 2).

Figura 2

Innovaciones, transiciones tecnológicas y posibilidades de transición sociotécnica (Sistema tecnológico de electricidad)



Fuente: elaboración propia

La posibilidad de generación distribuida de energía en pequeñas escalas (fotovoltaica y eólica) y de contar con dispositivos de almacenamiento que superen el problema de la irregularidad en la generación de electricidad

³¹ <https://www.power-technology.com/news/china-5gw-solar-farm-xinjiang/>

(baterías domesticas de litio y sodio) permiten estructurar micro y mini redes de energía, más accesibles a comunidades, instituciones públicas y hogares, otorgándoles mayor control y autonomía sobre sus requerimientos y usos (Córdova, 1996; Mercado *et al.*, 2022). Además, presentan ventajas respecto a la distribución centralizada en ahorro energético: entre un 8 y un 15 por ciento de la energía producida por esta última se pierde en la transmisión, en costos de infraestructura, ostensiblemente menores, y en la posibilidad de proveer energía a comunidades lejanas o de difícil acceso.³² Tecnológicamente, los cambios disruptivos evidencian una revolución tecnológica, pero, adicionalmente, la factibilidad de configurar redes que incluyan nuevos actores y nuevas formas de participación e interacción, lo que posibilitaría la transición sociotécnica (figura 2).

¿Transición sociotécnica en la energía?

Pero esta transición solo es posible si se modifican sustancialmente las interacciones entre los elementos integrantes del sistema sociotécnico (gráfico 1), impulsadas por factores socio-institucionales que respondan tanto al imperativo de disminuir las emisiones de GEI como el de los riesgos tecnológicos inherentes al desarrollo e implementación de las fuentes convencionales y las alternas, estimulando, además, formas más racionales de consumo. Incluiría, entre otros, pautas diferentes en la producción de conocimiento, nuevos enfoques y alcances en la legislación, tanto de regulación como de estímulo (internacionales, nacionales y locales), y una mayor participación y reconocimiento de movimientos y acciones comunitarias que, entre otras cosas, promuevan la evaluación participativa de tecnologías y hasta decisiones individuales sobre qué energía usar y cómo hacerlo (Córdova, 1996).

Geels y Shot (2007) establecen que las transiciones sociotécnicas resultan de interacciones en diversos niveles de la estructura social: a) el nicho tecnológico, donde pequeñas redes de actores dedicados a la I+DT desarrollan las innovaciones radicales que son las principales impulsoras de la transición; b) el régimen sociotécnico, ámbito en el que ingenieros, científicos, formuladores de políticas y grupos de intereses especiales contribuyen a modelar el desarrollo tecnológico y a estabilizar las trayectorias tecnológicas; c) el panorama sociotécnico, ámbito general, exógeno, que considera la macroeconomía, patrones culturales profundos, y procesos macro-políticos,

³² <https://www.microgridknowledge.com/about-microgrids/article/11429017/what-is-a-microgrid>

que pueden incidir en el régimen tecnológico en momentos en los que las innovaciones en el nicho no están plenamente desarrolladas.

Vista la configuración de la matriz energética, se infiere que las innovaciones radicales generadas en el nicho tecnológico no están impulsando la transición sociotécnica.

Geels (2010) reconoce que las transiciones hacia la sostenibilidad confrontan importantes obstáculos porque los sistemas tecnológicos están estabilizados mediante formas de bloqueo relacionados con intereses creados, patrones de comportamiento y regulaciones favorables, evidenciando la complejidad multidimensional de los cambios en las condiciones socio-técnicas. Esto refleja los desequilibrios de poder entre los actores dentro del régimen tecnológico y su capacidad de influir en las trayectorias, en especial el peso de «grupos de intereses especiales» donde destacan las corporaciones y algunos dirigentes y funcionarios de Estados. Yendo más allá, sostenemos que gran parte de las innovaciones de nicho son concebidas y, sobre todo implementadas, en arreglo a los intereses de estos actores, impulsores del crecimiento continuo, consolidando, por lo tanto, las estructuras socio-técnicas prevalecientes.

¿Avances en la transición ecológica?

La «transición energética limpia» en desarrollo, aun cuando considera la introducción de innovaciones radicales y algunos cambios en la organización de la matriz energética, no permite vislumbrar avances reales hacia la transición ecológica, básicamente porque se mantiene en una trayectoria tecnoeconómica que continúa demandando intensivamente materiales y energía. Las consecuencias ambientales y sociales derivadas del desarrollo de las tecnologías alternas de la energía, analizadas en este estudio, y la persistencia –al menos en el medio plazo– del uso de combustibles fósiles, lo evidencian. Esto sin reparar, además, en las consideraciones sobre la justeza de dicha transición por el impacto, muchas veces adverso, sobre los trabajadores y las comunidades, y la distribución de sus beneficios, temas que trascienden este estudio.³³

Se inquiera entonces sobre cuál debe ser la naturaleza de los cambios tecnológicos que permitan una transición sociotécnica, entendiendo que ésta debe implicar más que la sustitución de combustibles fósiles y la atenuación

³³ <https://www.ilo.org/media/69836/download>

de los impactos ambientales y los riesgos. Aunque la actual revolución tecnológica está transformando elementos medulares de los sistemas tecnológicos de la energía, no evita el aumento del calentamiento global con el agravante de que adiciona importantes impactos negativos de los procesos asociados a las energías alternas, empeorando la situación socioambiental del planeta. Así, ¿es posible que los cambios tecnológicos impulsen una transición sustentable?

Geels y Shot (2007) sostienen que los efectos de las interacciones entre los diferentes niveles (nicho tecnológico, régimen sociotécnico y panorama tecnológico) sobre la transición dependerán del momento en que se establezcan. La presión del panorama tecnológico sobre el régimen tecnológico es importante, sobre todo si se da en un momento en que las innovaciones de nicho están en fases tempranas de desarrollo. Asociamos aquí a la noción de panorama tecnológico la de marco socioinstitucional, en el que es más preciso identificar las acciones y su influencia sobre las transiciones, tecnológicas, sociotécnicas y ecológica.

Los cambios en este ámbito, señalan estos autores, influenciarán en el régimen tecnológico si los actores de este último perciben la presión y responden a ella. Por ejemplo, reaccionando contra las externalidades negativas que ellos mismos tienden a descuidar (Van de Poel, según Geels y Shot, 2007).

Se resalta en el marco socioinstitucional el papel de los grupos organizados y movimientos sociales que pueden protestar y exigir soluciones, presionando para lograr regulaciones más estrictas. El de científicos o ingenieros externos cuyo conocimiento especializado permite indicar problemas técnicos (Van de Poel, según Geels y Shot, 2007). Se agregaría aquí el de organismos técnicos y de regulación, clave para conocer el tipo y la magnitud de los impactos del desarrollo tecnológico sobre la salud y el ambiente, y establecer los estándares de control.

Acciones en el marco socioinstitucional generaron aprendizajes importantes en torno al problema. La regulación en materia ambiental impulsó el desarrollo de los conocimientos que permitieron caracterizar los problemas y estimar las emisiones de GEI e indujeron el desarrollo de tecnologías que, en un primer momento, capturaban las emisiones y, posteriormente, de menor generación (Mercado y Córdova, 2014). En términos de Geels y Shot (2007) incidieron en el régimen tecnológico. Sin embargo, como se ha señalado, no ha sido suficiente para aminorar los impactos, observándose una asombrosa

agudización de los eventos climáticos extremos.

Para avanzar hacia la transición ecológica es necesario transformar los sistemas tecnológicos, no apenas en sus elementos técnicos. Para conseguirlo, tan o más importante que incidir en el régimen tecnológico es procurar modificar la actual trayectoria tecnoeconómica en la que es prácticamente imposible una transición ecológica, asumiendo, incluso, la determinista noción de concebirla como «el proceso de innovación tecnológica para lograr el cambio en nuestra sociedad considerando el cumplimiento de los criterios de sostenibilidad ambiental» (Rotondo *et al.*, 2022).

Conclusiones

En el transcurso del presente siglo el consumo global de energía ha aumentado a un ritmo que evidencia apenas un desacoplamiento relativo respecto al crecimiento económico. Aun cuando se observan mejoras en la intensidad energética, con disparidades regionales importantes, el actual ritmo de crecimiento del PIB global se sustenta en un aumento absoluto del consumo energético. Pero, además, si se observa el crecimiento de la explotación de minerales necesarios para avanzar en la «transición energética limpia», muy superior al de la economía, se comprueba que crecimiento económico y crecimiento de la producción y uso de la energía permanecen acoplados. Adicionalmente, al cotejar el crecimiento económico con el de las emisiones de CO₂ se determina, también, que el desacoplamiento es relativo.

Los escenarios probables de consumo de energía de la EIA para 2050 (escenario de políticas declaradas y de promesas anunciadas) proyectan poca variación en la tasa media anual de crecimiento total respecto a 2022. En el primer caso, 0,48 por ciento con decrecimiento moderado de las energías fósiles (-0,52 por ciento) y crecimiento sostenido de las energías alternas (3,9 por ciento), seguido de la nuclear (1,75 por ciento). En el segundo caso, una discreta tasa negativa (-0,11 por ciento) con disminución importante de las fósiles (-2,8 por ciento) y aumento sustancial de las alternas (5,21 por ciento) y la nuclear (2,48 por ciento). Cabe señalar, que nuevos proyectos globales en hidrocarburos, sobre todo hasta (2035) colocan dudas acerca de que estos escenarios se cumplan.

Esto complicará sustancialmente la ya precaria situación ambiental del planeta. El nivel de emisiones de CO₂ derivados de estos escenarios, asumiendo incluso que todos los países cumplieran integralmente los compromisos

asumidos en las Contribuciones Determinadas a Nivel Nacional, resultaría en una disminución de emisiones muy inferior a la requerida para mantener el calentamiento global en 1,5° centígrados por encima de la era preindustrial. Este, incluso superaría los 2° centígrados, considerado el escenario «límite», en el cual aún sería posible estabilizar el clima, pero con una agudización tremenda de los impactos ambientales extremos con drásticas implicaciones sociales (IPCC, 2018).

El actual enfoque geopolítico dado a las emisiones de GEI, centrado en reducir emisiones y capturar CO₂, son insuficientes y carentes de efectividad (Hansen *et al.*, 2023). Paradójicamente, los intentos de superar la dependencia de los combustibles fósiles están generando nuevos impactos sociales y ambientales con afectaciones sobre ecosistemas terrestres y marinos. La raíz del problema radica en que las formas de producción y consumo continúan fundamentadas en el crecimiento económico continuo.

Esto último permite entender porqué, aun cuando surgen innovaciones disruptivas interrelacionadas que están dando cauce a una revolución tecnológica que cambia elementos técnicos y organizacionales del sistema tecnológico de la energía, no conducen a una transición energética limpia. Las transformaciones tecnológicas son insuficientes, lo que lleva a considerar cuáles y en que ámbito, deben ser los cambios que impulsen esta transición, identificándolos en aquellas interacciones entre los elementos integrantes del sistema sociotécnico que sean capaces de modificar las funciones societales en y en torno a la energía.

Estos cambios deben ser impulsados por factores socio-institucionales que respondan tanto al imperativo de disminuir las emisiones de GEI como el de los riesgos tecnológicos de las fuentes de energía y que incentiven formas más racionales de consumo. Deben reorientarse los estímulos de la actividad innovadora que es la impulsora de la transición. Es necesario ampliar la participación de los actores dentro del régimen tecnológico y equilibrar sus capacidades de influir en las decisiones sobre en qué y para qué innovar.

La «transición energética limpia» en desarrollo no evidencia avances concretos hacia la transición ecológica, básicamente porque se mantiene en una trayectoria tecnoeconómica que continúa demandando intensivamente materiales y energía. Es imprescindible, entonces, modificar las interacciones en el sistema sociotécnico y ello supone deslastrar las diversas actividades humanas de la influencia avasallante del paradigma del crecimiento continuo en su orientación y funcionamiento, superar la obsesión patológica con

el producto interno bruto (PIB), consustancial al consumo exacerbado y el derroche, como el indicador más importante para la formulación de políticas y la planificación del desarrollo (WHO, 2022).

En la capacidad de los marcos socioinstitucionales, globales y locales, de proponer, asumir y consensuar acuerdos y políticas que efectivamente cambien la configuración centralizada de generación, distribución y consumo de la matriz energética, de reducir los desequilibrios de poder entre los actores sociales en relación con la orientación del desarrollo tecnológico (Mercado *et al.*, 2022) y de impulsar cambios profundos en la cultura del consumo, radica la posibilidad de avanzar hacia la transición ecológica.

Referencias bibliográficas

Amnistía Internacional (2023). «Powering Change or Business as Usual? Forced Evictions At Industrial Cobalt And Copper Mines In The Democratic Republic Of The Congo». Disponible en: <file:///C:/Users/alexa/Downloads/AFR6270092023ENGLISH.pdf>.

Antoniades, A. y A. Antonarakis (2020). «Financial Crises, Environment and Transition», en: A. Antoniades, A. Antonarakis, L. Kempf, editors, *Financial Crises, Poverty and Environmental Sustainability Challenges in the Context of the SDGs*. Springer Nature. Switzerland.

Asian Development Bank (2016). «PRC: Inner Mongolia Autonomous Region Environment Improvement Project (Phase II)». Disponible en: <https://www.adb.org/projects/40634-012/main>

Bank for International Settlements (2023). «The crypto ecosystem: key elements and risks». Disponible en: https://www.bis.org/search/index.htm?globalset_q=The+crypto+ecosystem%3A+key+elements+and+risks

Bartolini, S. y B. Bonatti (2002). «Environmental and social degradation as the engine of economic growth». *Ecological Economics*. 43, pp 1-16.

Belo Moreira, M. y C. Gerry (2003). «The impact of global economic integration on the countryside: reflections on the Portuguese experience», en F. Entrena, edit., *Local reactions to globalization processes: competitive adaptation or socio-economic erosion?* pp.69-94. New York: Nova Science Publishers.

Bloomberg (2023). «Electric Outlook 2023. Bloomberg Finance LP 2023». Disponible en: <https://about.bnef.com/new-energy-outlook/>

CEC (2002). «Industrial Pollution and Waste». Commission for Environmental Cooperation. Disponible en: http://www.cec.org/publications/?_fcwp_search=Industrial%20pollution%20

Chacholiades, M. (1992): *Economía internacional*. México: Mc Graw Hill. 2ª edición.

Clarivate. Chinese Academy of Sciences (2023). «Research Fronts 2023». Disponible en: https://discover.clarivate.com/Research_Fronts_2023_EN

Córdova, Karenia (1996) «Energía y participación; ¿utopía o realidad?» *Revista Terra*, vol. XI-XII, n° 20-21, 1996. Disponible en: https://www.academia.edu/747857/Energia_y_participacion_utopia_o_realidad

- Díaz Paz, W., M. Escosteguy, L. Seghezze, M. Hufty, E. Kruse y M. Iribarnegaray** (2023). «Lithium mining, water resources, and socio-economic issues in northern Argentina: We are not all in the same boat». *Resources Policy* 81. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/367148287_Lithium_mining_water_resources_and_socio-economic_issues_in_northern_Argentina_We_are_not_all_in_the_same_boat
- EPA** (2023). «New Source Performance Standards for Greenhouse Gas Emissions From New, Modified, and Reconstructed Fossil Fuel-Fired Electric Generating Units; Emission Guidelines for Greenhouse Gas Emissions From Existing Fossil Fuel-Fired Electric Generating Units; and Repeal of the Affordable Clean Energy Rule». *Federal Register*, 88-99. Disponible en: <https://www.federalregister.gov/documents/2023/05/23/2023-10141/new-source-performance-standards-for-greenhouse-gas-emissions-from-new-modified-and-reconstructed>
- Ericsson, M.** (2023). «The evolving structure of the global mining industry». *Matériaux & Techniques* 111, 303. <https://doi.org/10.1051/mattech/2023017>.
- ETRES-Erasmus+** (2016). «Ecological transition: accompaniment of citizen dynamics and environmental education towards sustainable development within the framework of the ETRES project». Disponible en: <https://etreserasmus.eu/?PagePrincipaleEn>
- Fettweis, G. y E. Zimmermann** (2008). «ICT Energy Consumption-Trends and Challenges». The 11th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC 2008). Disponible en: https://www.vodafone-chair.org/pbls/legacy/gerhard-fettweis/ICT_Energy_Consumption_-_Trends_and_Challenges.pdf
- García, E.** (2018). «La transición ecológica: definición y trayectorias complejas». *Ambienta. La revista del Ministerio del Medio Ambiente*, 125, pp. 86-100. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/329786240_La_transicion_ecologica_definicion_y_trayectorias_complejas
- Geels, F.** (2010). «Ontologies, socio-technical transitions (to sustainability), and the multi-level perspective». *Research Policy*, 39, 4, pp. 495-510.
- Geels, F.** (2004). «From sectoral systems of innovation to socio-technical systems: Insights about dynamics and change from sociology and institutional theory». *Research Policy*, 33, 6–7, pp. 897-920.
- Geels, F.** (2002). «Technological transitions as evolutionary reconfiguration processes: a multi-level perspective and a case-study». *Research Policy*, 31, pp. 1257–1274.
- Geels, F. y J. Shot** (2007). «Typology of sociotechnical transition pathways». *Research Policy*, 36, pp. 399–417.
- Goldblatt, J.** (2015). Conflict and Coltan: Resource Extraction and Collision in The Democratic Republic of the Congo and Venezuela. Ph.D Thesis. Disponible en: https://research.library.fordham.edu/enviro_2015
- Guo, J., CH. Zhong Li, y Ch. Wei** (2021). «Decoupling economic and energy growth: aspiration or reality?». *Environmental Research Letters*, 16 044017. Disponible en: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abe432>
- Hacibedel, B. y H. Perez-Saiz** (2023). Assessing Macrofinancial Risks from Crypto Assets. Working Paper, IMF. Disponible en: <https://www.imf.org/en/Publications/WP/Issues/2023/09/30/Assessing-Macrofinancial-Risks-from-Crypto-Assets-539473>
- Hansen, J.E., M. Sato, L. Simons, L.S. Nazarenko, I. Sangha, P. Kharecha, J.C. Zachos, K. von Schuckmann, N.G. Loeb, M.B. Osman, Q. Jin, G. Tselioudis, E. Jeong, A. Lacis, R. Ruedy, G. Russell, J. Cao y J. Li** (2023). Global warming in the pipeline. Oxford Open Climate Change. Disponible en: <https://doi.org/10.1093/oxfclm/kgad008>.

Hennicke, P. y S. Sewerin (2009). «Decoupling GDP Growth ('Quality of Life') from Resource Use» A paper on behalf of the International Panel for Sustainable Resource Management. Disponible en: <http://wupperinst.org/en/publications/details/wi/a/s/ad/858/>

Hughes, T.P (1987). «The Evolution of Large Technological Systems», en WE Bijker, T Hugues and TJ Pinch, edit. *The Social Construction of Technological Systems*. NEW Directions in the Sociology and History of Technology, The MIT Press, Massachusetts, pp. 51-82.

IEA (2019). «World Energy Outlook-2019». Disponible en: <https://www.iea.org/search?q=World%20Energy%20Outlook%202019>

IEA (2022). «The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions». Disponible en: <https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions>

IEA (2020). «Technology Innovation to Accelerate Energy Transitions». Disponible en: https://iea.blob.core.windows.net/assets/c578edac-2b69-4a5b-b8a9-0d007a9a8106/Technology_Innovation_to_Accelerate_Energy_Transitions.pdf

IEA (2024a). «Global EV Outlook 2024 Moving towards increased affordability». Disponible en: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2024>

IEA (2024b) «Electricity 2024 Analysis and forecast to 2026». Disponible en: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/18f3ed24-4b26-4c83-a3d2-8a1be51c8cc8/Electricity2024-Analysisandforecastto2026.pdf>

IEEFA (2018). «The Seven Technology Disruptions Driving the Global Energy transition: A Primer». Disponible en: <https://ieefa.org/resources/ieefa-report-seven-disruptions-driving-modernization-electricity-generation-and>

IPCC (2018). «Calentamiento global de 1,5 °C. Resumen para responsables de políticas». Disponible en: https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/09/SR15_Summary_Volume_spanish.pdf&ved=2ahUKEWi0ua7wt-qGAXUkIQIHcLSBKIQFnoECA8QAQ&usg=AOvVaw3uMbGn5Yc9_WD_o9Mh_3jB

Katz, Jorge (1976). *Importación de Tecnología, aprendizaje local e industrialización independiente*. México: Fondo de Cultura Económica.

Levin, K. y D. Tirpak (2018). «8 Things You Need to Know About the IPCC 1.5°C» Report. WRI. Disponible en: <https://www.wri.org/insights/8-things-you-need-know-about-ipcc-15c-report>

Li, P., J. Yang, M. Islam y S. Ren (2023). «Making AI Less “Thirsty”: Uncovering and Addressing the Secret Water Footprint of AI Models». Disponible en: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2304.03271>

Lungenstrass, L., D. González, J. Figueroa y C. Salas (2023). COP28: Resumen de hitos y acuerdos alcanzados. Centro de Cambio Global UC (CCG-UC). Santiago, Chile.

Maggiore, M. y C. Matthews (2023). Greenwashing' fears plague mining audit industry. Disponible en: <https://www.investigate-europe.eu/posts/greenwashing-fears-mining-audit-industry>

McNeill, J. (2000). *Something New under the Sun: An Environmental History of the Twentieth-Century World*. New York: W. W. Norton Company.

Mercado, A. K. Córdova y H. Vessuri (2022). «The technology of need: technology of sustainability?». Tapuya: *Latin American Science, Technology and Society*, 5:1, DOI: 10.1080/25729861.2022.2041789

- Mercado, A.** y **K. Córdova** (2014). «Desarrollo Tecnológico en Baterías e Impulsión Eléctrica ¿Sistemas tecnológicos Disruptivos Promovidos por Imperativos Ambientales?». *Cuadernos del Cendes*, año 31, n° 85, pp. 1-21.
- Moreau, V.** y **F. Vuille** (2018) Decoupling energy use and economic growth: Counter evidence from structural effects and embodied energy in trade. *Applied Energy*, 215, pp. 54–62.
- Muraviov, K. A. Makurin, L. Sloboda, N. Tataryn y R. Holub** (2023). «The current State of Development and the Impact of Cryptocurrency on the Global Economy». *Review of Economics and Finance*, 21, pp. 653-660.
- Najam, A.** y **C. Cleveland** (2003). «Energy and Sustainable Development at Global Environmental Summits: An Evolving Agenda». *Environment, Development and Sustainability*. 5: 117–138.
- OECD** (2001). «The Well-being of Nations The Role of Human and Social Capital». Disponible en: https://www.oecd-ilibrary.org/education/the-well-being-of-nations_9789264189515-en
- Ogada, M.** (2023). «Why the tech-driven fictitious economy is a real threat to Africa». *The Pan African Review*. Disponible en: <https://panafricanreview.com/why-the-tech-driven-fictitious-economy-is-a-real-threat-to-africa/> (artículo de prensa)
- Perez, C.** (2010). «Technological revolutions and techno-economic paradigms». *Cambridge Journal of Economics*, vol. 34, n°1, pp. 185-202.
- Pérez, C.** (2020). «Revoluciones tecnológicas y paradigmas tecnoeconómicos», en: D. Suárez, A. Erbes y M. Barletta, comp., *Teoría de la innovación: evolución, tendencias y desafíos: herramientas conceptuales para la enseñanza y el aprendizaje*. Disponible en: <https://carlotaperez.org/publicaciones/#RT-ES2010>.
- Robinson, N.** (2013) «Keynote: Sustaining Society in the Anthropocene Epoch» *Journal Int Law and Policy*, 467. Disponible en: <http://www.digitalcommons.pace.edu/lawfaculty/927/>.
- Romeo, G.** (2018). «Riesgo ambiental e incertidumbre en la producción del litio en salares de Argentina, Bolivia y Chile», en B. Fornillo, coord., *Litio en Sudamérica Geopolítica, energía y territorios*. Colección Chico Méndez, lealc-Clacso.
- Rostow, W.** (1959). «The Economic History Review», *New Series*, 12. 1, pp. 1-16. Disponible en: <http://www.jstor.org/stable/2591077>.
- Rotondo F., P. Perchinunno, S. L'Abbate y L. Mongelli** (2022). Ecological transition and sustainable development: integrated statistical indicators to support public policies. *Science Report* 12, 18513. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-23085-0>
- Shin, D.** y **J. Rice** (2022). Cryptocurrency: A panacea for economic growth and sustainability? A critical review of crypto innovation. *Telematics and Informatics*, 71, <https://doi.org/10.1016/j.tele.2022.101830>
- Smith, A.** (1994). *La riqueza de las Naciones*. Alianza Editorial, Madrid.
- SOS Orinoco** (2020). «Coltán: El Contrabando del 'Oro Azul' por el Régimen en Venezuela». Disponible en: <https://sosorinoco.org/es/informes/coltan-el-contrabando-del-oro-azul-por-el-regimen-en-venezuela/>
- Sunkel, O.** y **P. Paz** (1970). «El Subdesarrollo Latinoamericano y la teoría del Desarrollo». México: Siglo XXI editores.

UNECE (2024). Critical Minerals for the Sustainable Energy Transition A Guidebook to Support Intergenerational Action. Ginebra. Disponible en: <https://unece.org/sustainable-energy/publications/guidebook-critical-minerals-sustainable-energy-transition-support>

UNEP (2011). Decoupling natural resource use and environmental impacts from economic growth, A Report of the Working Group on Decoupling to the International Resource Panel. United Nations Environment Programme.

UNEP (2023a). «Broken Record Temperatures hit new highs, yet world fails to cut emissions (again)». Emissions Gap Report 2023. Disponible en: <https://www.unep.org/resources/emissions-gap-report-2023>

UNEP (2023b). Informe sobre la Brecha de Adaptation 2023. URL: Disponible en: <https://www.unep.org/es/resources/informe-sobre-la-brecha-de-adaptacion-2023>

WHO (2022). «Valuing Health for All: Rethinking and building a whole-of-society approach». Disponible en: <https://www.who.int/publications/m/item/valuing-health-for-all-rethinking-and-building-a-whole-of-society-approach---the-who-council-on-the-economics-of-health-for-all---council-brief-no.-3>

Zero Carbon Analytics (2023). «Do we need deep sea mining for the energy transition?» Disponible en: <https://zerocarbon-analytics.org/archives/netzero/do-we-need-deep-sea-mining-for-the-energy-transition>