

Contexto internacional para la implementación de la transición energética

Alexánder Gómez
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA Y MECATRÓNICA
UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA, BOGOTÁ, D.C.

Contexto internacional para la implementación de los procesos de transición energética

Autor:

Dr.-Ing. Alexander Gómez

Profesor Titular

Departamento de Ingeniería Mecánica y

Mecatrónica

Facultad de Ingeniería

Universidad Nacional de Colombia

Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica

Universidad Nacional de Colombia

Bogotá, D.C., Colombia

2026

Contenido

1.	Introducción	1
2.	La transición energética en el contexto de las transformaciones políticas y económicas	1
2.1	Motivaciones políticas para la transición energética.....	1
2.2	Condiciones marco y objetivos de la transición energética	3
2.3	La transición desde la perspectiva de la economía energética	4
3.	Políticas orientadas por misiones para la transición energética	6
4.	Consecuencias sistémicas de la transición energética	8
4.1	Dependencia geográfica de las fuentes renovables de energía.....	9
4.2	Dependencia temporal de las fuentes renovables de energía.....	9
4.3	Menores escalas de producción en el sistema energético distribuido.....	10
4.4	El ordenamiento territorial y la presencia física de las tecnologías de las energías renovables.....	11
5.	Focos críticos de investigación y desarrollo para la transición energética	12
5.1	La transición eléctrica	12
5.2	La transición del transporte	12
5.3	La transición de la energía térmica (o de calor)	13
5.4	Integración y eficiencia del sistema energético	13
5.5	El hidrógeno y los combustibles sintéticos.....	13
6.	Indicadores de desempeño para la implementación de la transición energética	14
	Referencias bibliográficas	16
	Lista de siglas.....	21

1. Introducción

Este documento presenta el contexto internacional que enmarca los procesos de implementación de la transición energética, atendiendo a sus dimensiones políticas, económicas y técnicas, así como a sus principales consecuencias sistémicas. A partir de este enfoque, se examinan las motivaciones que orientan su desarrollo, los factores que condicionan las distintas trayectorias nacionales y los principales retos asociados a la incorporación de las fuentes renovables de energía, la electrificación, la transición en el transporte y la descarbonización del calor para los procesos industriales. Igualmente, se consideran los desafíos asociados con la digitalización del sistema energético, el desarrollo de nuevos combustibles y la evaluación del desempeño del sistema energético y el proceso de transición mediante indicadores. Este capítulo ofrece una base de referencia para los análisis de los capítulos posteriores, que buscan establecer un contexto nacional y de sus regiones para abordar los procesos de transición energética en el país.

2. La transición energética en el contexto de las transformaciones políticas y económicas

La transición energética se enmarca en el contexto de las transformaciones sociopolíticas, socioeconómicas y tecnoeconómicas de largo plazo, (Cherp et al., 2018; Miller et al., 2015; Tran et al., 2023). Debido a estas condiciones, es importante adoptar una perspectiva sistémica, (Delafield et al., 2021; Seddighi et al., 2023), que permite analizar la transición energética a través de las motivaciones políticas de largo plazo, los objetivos de ese proceso y las condiciones marco en las que debe desarrollarse, considerando integralmente los sectores políticos y sociales. Este capítulo describe el contexto internacional y las principales características de las transformaciones políticas y económicas asociadas a la transición energética.

2.1 Motivaciones políticas para la transición energética

Las principales motivaciones políticas para la puesta en marcha de los procesos de transición energética en las últimas décadas pueden clasificarse en tres grandes agrupaciones: las preocupaciones por la seguridad en el suministro energético, los impactos en el medio ambiente y la competitividad económica asociada a la energía, (Chen et al., 2019; Kim & Park, 2023; Pingkuo & Huan, 2022).

Desde la década de 1970, se han intensificado las posturas críticas ante la explotación de los recursos naturales, especialmente de los combustibles de origen fósil. Estas críticas se enfocaron inicialmente en el carácter limitado (o finito) de estos recursos. Luego, se dirigieron intensivamente hacia los impactos ambientales, especialmente los ocasionados por la crisis climática debida al calentamiento global¹, lo que ha permitido consolidar un cambio global de perspectiva en los debates políticos y sociales sobre las razones para promover los procesos actuales de transición energética. Ante este desenlace, es importante notar que las reservas de combustibles fósiles no se han agotado, según las proyecciones que se realizaron en las décadas anteriores y, paradójicamente, algunos de los efectos del calentamiento global han contribuido al descubrimiento de más reservas o han facilitado su explotación, por ejemplo, debido al deshielo de algunas regiones.

La reducción de la dependencia en el uso de los combustibles fósiles, reforzando al mismo tiempo la seguridad y la soberanía energéticas, puede identificarse como una motivación política independiente de la puramente ambiental, asociada con la reducción de las emisiones de carbono a la atmósfera. Esta motivación ha sido un gran impulsor para desplegar las tecnologías de fracturación hidráulica (*fracking*) para la extracción de gas en Estados Unidos.

¹ Este calentamiento es provocado por el incremento de las emisiones y la concentración de gases de efecto invernadero, GEI, en la atmósfera, que se cuantifican normalmente mediante las emisiones equivalentes de dióxido de carbono (CO_{2,eq}).

En otro aspecto, el abandono del uso de la energía nuclear ha sido una motivación para promover procesos de transición energética en algunos países, principalmente por los riesgos asociados al uso de esta fuente de energía y a la disposición de los residuos producidos. Accidentes como el de Fukushima en Japón en 2011 provocaron reacciones sociales de rechazo a la energía nuclear en otros países, (Upham et al., 2020; Wakiyama et al., 2014). Este suceso llevó al gobierno federal alemán de ese momento, con un amplio respaldo multipartidista, a tomar la decisión de abandonar el uso de la energía nuclear mediante la salida progresiva de operación de las centrales nucleares del país hasta 2022. Desde ese momento, la percepción de que generar energía eléctrica a partir de la energía nuclear es altamente peligroso se consolidó como una de las motivaciones principales de la política energética alemana para intensificar los procesos en desarrollo para la transición energética. En abril de 2023 se clausuró la operación de las tres últimas plantas de ese tipo en el país.

El ataque de Rusia a Ucrania en 2022 volvió a posicionar en el debate los argumentos sobre la soberanía energética nacional, (Wiertz et al., 2023). Esto fue relevante, entre otras razones, por la amenaza de escasez de combustibles en Europa durante el invierno de 2022, debido a la suspensión en el suministro de gas natural procedente de Rusia. Este conflicto también ha ocasionado cambios en la opinión pública, que en algunos países se manifiestan en mayores niveles de aceptación respecto al uso de las fuentes de energía tradicionales de origen fósil.

En Francia se desarrolló desde 2018 un movimiento de protesta social a través de los *chalecos amarillos*, que surgió inicialmente de un fuerte rechazo social a los impuestos al carbono. De forma similar, la eliminación de subvenciones y el incremento de los precios de los combustibles fósiles han provocado movimientos de protesta en América Latina, como ha sucedido en Ecuador desde hace varios años.

Actualmente se presentan otros desarrollos geopolíticos que inciden de manera directa en la orientación e implementación de los procesos de transición energética a escala regional. El cambio de gobierno federal en Estados Unidos en 2025 ha representado un ajuste drástico en la política energética de ese país, que ha priorizado nuevamente el uso de la energía de origen fósil y ha detenido el fomento al despliegue de las fuentes renovables de energía del gobierno antecesor. A esto se unen eventos como la intervención de Estados Unidos en Venezuela en enero de 2026, que ha conducido a que este país retome la ruta de explotación y exportación de sus reservas petroleras y de gas. Y, posteriormente, a finales de febrero de 2026, los ataques de Israel y Estados Unidos a Irán, que han afectado directamente el mercado global del petróleo y el gas natural.

Otras motivaciones complementarias para implementar procesos de transición energética están relacionadas con la promoción de la innovación, el desarrollo industrial y las oportunidades de exportación de tecnologías asociadas a los nuevos sistemas energéticos por parte de las economías nacionales.

En áreas complementarias, la exploración y explotación de los recursos naturales se ha vuelto a plantear recientemente en la discusión pública en el marco de los procesos de transición energética, (Bazilian, 2018; Schischke et al., 2023). Materias primas como litio, níquel, cobalto, cobre, tierras raras, galio, germanio, indio, telurio y los elementos del grupo del platino son necesarias para la fabricación de las tecnologías de transformación, las instalaciones y las redes para el sistema operativo con energías renovables y de los nuevos productos de uso final, como los vehículos eléctricos, (Chazel et al., 2023). Es importante anotar que estos recursos críticos sólo se consumen parcialmente durante su uso, en contraste con el consumo completo de los recursos fósiles, y es factible incorporarlos bajo los esquemas de la economía circular, (Kullmann et al., 2022; Müller et al., 2023). En este aspecto, a través de la transición energética entran también en juego los intereses de explotación de este tipo de recursos y los asociados con los productores de las tecnologías.

Las motivaciones políticas para emprender los procesos de transición energética se plantean en función del contexto nacional, pero es necesaria una acción coordinada a nivel internacional. Los grandes retos de la crisis climática pueden superarse si se logra un compromiso global de todos los países. Aun así, los debates políticos tienden a centrarse en

el contexto nacional y se critica frecuentemente la eficacia de las contribuciones nacionales a la reducción de las emisiones globales de carbono a la atmósfera. Una acción coordinada a nivel mundial permitiría lograr una mayor eficacia y menores costos en el uso de los recursos destinados a la lucha contra el cambio climático. Las decisiones independientes adoptadas en función de motivaciones políticas e intereses nacionales reflejan este tipo de desarticulación regional. Así, por ejemplo, aunque Alemania eliminó progresivamente el uso de sus centrales nucleares de energía, cerca de sus fronteras en otros países siguen funcionando plantas de este tipo con mayores niveles de riesgo operativo. Del mismo modo, Francia fomenta actualmente el uso de la energía nuclear y Polonia el uso del carbón, con altos niveles de aceptación pública.

Estos desarrollos evidencian conflictos y contradicciones entre las motivaciones políticas para la avanzar con los procesos de transición energética, como el existente entre el objetivo de mitigar las emisiones de CO₂ e implementar al mismo tiempo el abandono del uso de la energía nuclear, que produce muy bajas emisiones de CO₂. En otro sentido, esta mitigación de emisiones puede lograrse incluso mediante el uso de los combustibles fósiles, si se implementan tecnologías de captura, uso y almacenamiento de carbono, CCUS (por sus siglas en inglés). En general, la combinación de motivaciones políticas es parte inherente y relevante para la implementación de los procesos de transición energética.

Este conjunto de dinámicas a nivel mundial demuestra que el debate político y el ambiente social determinan la dirección y las opciones políticas para la transición energética, con consecuencias económicas directas para toda la población.

2.2 Condiciones marco y objetivos de la transición energética

Las motivaciones políticas para llevar a cabo los procesos de transición energética cumplen la función de macroobjetivos, brindando articulación entre las condiciones marco del sistema político y económico en el que se implementan y los objetivos específicos establecidos para estos procesos, (Kuittinen & Velte, 2018).

Las condiciones marco del sistema político y económico hacen referencia a tres componentes principales:

- La garantía de seguridad del abastecimiento energético, insumo fundamental para el funcionamiento de la economía y para el bienestar social.
- La eficacia económica y la eficiencia en los costos de producción, que permiten que la energía sea asequible para toda la población y un factor competitivo para la economía nacional.
- La conformidad con el sistema económico, que se define normalmente a través del marco regulatorio del sector energético.

Estas condiciones marco han determinado el desarrollo de las políticas energéticas en las últimas décadas, que ha establecido tres objetivos principales para garantizar la fiabilidad del suministro energético, la sostenibilidad ambiental asociada a su uso y la asequibilidad a los servicios energéticos, determinada por la competitividad económica. Estas características, a su vez, determinan las condiciones de aceptación social del sistema energético y sus tecnologías. Este triángulo de objetivos de la política energética cuenta con una amplia aceptación política en muchos países y ofrece una base sólida para construir los procesos de transición energética, (WEC, 2024), en función del contexto local e independientemente de los enfoques ideológicos.

Los procesos de transición energética ocurren en horizontes de tiempo de largo plazo. De acuerdo con los compromisos establecidos en el Acuerdo de París en 2015, se han planteado metas de reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero para alcanzar la neutralidad de carbono en 2050, con avances intermedios de referencia para 2030. La transición energética establece objetivos cuantificados correspondientemente con esos horizontes temporales a largo plazo hasta 2050. Este horizonte supera los períodos de las administraciones políticas temporales en los sistemas democráticos, por lo que la transición energética debe concebirse como un proyecto de la sociedad.

La magnitud de estos objetivos específicos y los plazos para alcanzarlos, es decir, la velocidad o ritmo de implementación, determinan los costos de implementación de la transición energética, (Felder et al., 2021).

Estos procesos de transición pueden llevarse a cabo a través de estructuras centralizadas, que corresponden con las economías planificadas, o a través de estructuras descentralizadas, que promuevan la autosuficiencia energética bajo los mecanismos de las economías de mercado. Ambos tipos de estructura permiten responder a las motivaciones políticas planteadas y a cumplir los objetivos específicos establecidos para la transición energética. Las rutas de implementación que se han establecido hasta la fecha en varios países toman elementos de ambas estructuras, especialmente en lo relacionado con el cumplimiento simultáneo de las condiciones marco, (Böhm et al., 2019). Este cumplimiento representa retos para la transición energética, dadas algunas de las tensiones implícitas en el proceso de implementación, (Mersch et al., 2023):

- La seguridad del abastecimiento energético debe tener en cuenta los retos que implica la variabilidad de las fuentes de energía renovable, debido a su dependencia de las condiciones geográficas y climáticas, y los cambios en el uso del suelo y del ordenamiento territorial.
- El cumplimiento de los criterios de eficacia económica puede verse comprometido al incorporar esquemas tarifarios para incentivar el despliegue de las energías renovables. Esto puede suceder, especialmente, a través del pago tarifario por la alimentación de electricidad a la red mediante contratos a largo plazo que, dependiendo de las condiciones del esquema, pueden representar posteriormente cargas superiores de costos para todos los usuarios, como ha sucedido parcialmente en Alemania.
- La transición energética representa en sí misma una forma de intervención en el mercado.

El desarrollo político debe buscar limitar al mínimo necesario las tensiones con las condiciones marco institucionales, establecidas mediante la constitución nacional, causadas por la implementación de los procesos de transición energética. Para ello, debe establecerse una estructura adecuada de gobernanza de los actores del sistema, articulando los cuatro niveles principales: el sistema político democrático, los mecanismos de coordinación de las instituciones estatales, la dinámica de los mercados competitivos y los esquemas de autoorganización de la sociedad civil.

Las motivaciones políticas, los objetivos y las condiciones marco (constitucionales) definen algunos de los componentes concretos, sin determinar una ruta única para desarrollar los procesos de transición energética. Esto permite la implementación de diversos escenarios energéticos futuros que cumplan con los objetivos específicos que se fijan en función del contexto local. El proceso de definición de esos escenarios y de las rutas para alcanzarlos suele estar acompañado de un intenso debate político, debido a la magnitud de la transformación y al número de actores e intereses involucrados. Por una parte, es difícil determinar con precisión las consecuencias de una decisión concreta, especialmente respecto a los costos económicos, debido a la complejidad de los mercados, las interconexiones entre los diversos niveles (influenciados, además, externamente a la región o el país) y el gran número y diversidad de los actores involucrados. Por otra parte, incluso si las consecuencias de una decisión estuviesen claramente definidas, pueden presentarse impactos diferenciados sobre las condiciones marco generales (o constitucionales), lo que requiere la toma de decisiones políticas sobre la ruta de implementación que deba seguirse.

2.3 La transición desde la perspectiva de la economía energética

A partir de la investigación climática se establecen los estándares requeridos para la reducción de las emisiones atmosféricas y, mediante la economía, los instrumentos para cumplirlos, (Swilling et al., 2022). Los estudios del IPCC para limitar el calentamiento global a 2 °C o a 1,5 °C establecen la concentración máxima admisible de CO₂ en la atmósfera, las emisiones máximas y las vías para su reducción. Los costos externos asociados a las emisiones atmosféricas de carbono se incorporan entonces mediante la fijación de precios de las emisiones de CO₂ a través de impuestos o del mercado de emisiones, (Chien et al., 2023; Freire-González & Puig-Ventosa, 2019).

Las principales dificultades para internalizar los costos en el sector energético son metodológicas, por la complejidad de cuantificarlos (¿cuánto cuesta la transición climática?), (Jacques et al., 2023), y políticas y económicas, por el rechazo a los impuestos ecológicos o a las emisiones de CO₂, como lo demostró el movimiento de los *chalecos amarillos* en Francia. Esta dificultad para estimar las externalidades es una de las críticas a la inclusión de impuestos ambientales basados en la internalización de los costos externos futuros, estimados bajo condiciones de alta incertidumbre, (Kolb et al., 2022). Por otra parte, la no internalización de los costos en el sector de los combustibles fósiles implica subvenciones implícitas, ocultas o en la sombra, para este sector, (Valayer et al., 2019).

Por esta razón, se plantean medidas y arreglos institucionales para reorientar los incentivos con los que hoy actúa el mercado y que, de dejarse actuar libremente, no permitirían modificar los mercados financieros de producción de bienes y servicios y de capital a la velocidad que se necesita, (Bárcena Ibarra et al., 2020). Las acciones de política implican medidas tributarias, normativas, fomento de inversiones, pagos por servicios ambientales y el papel de la banca de desarrollo y los gastos asociados a la adaptación (territorial, agropecuaria, manejo hídrico, entre otras). Todas estas deben definirse como planes integrales que las adopten y establezcan el horizonte temporal de su implementación, de manera que sean financieramente viables y social y ambientalmente sostenibles.

La coordinación de las actividades de protección climática conforme con el mercado se basa en conseguir eficiencia en los costos ocasionados por el cumplimiento de los objetivos climáticos. La premisa tradicional de la economía medioambiental asume que, en el caso de un precio uniforme del CO₂, siempre se evitarán las emisiones si los costos de reducción respectivos son inferiores a ese precio del CO₂. Esto genera en los mecanismos de mercado procesos de búsqueda, descubrimiento, invención e innovación, que seleccionan las soluciones más efectivas y eficientes e incentivan la puesta en marcha de actividades estratégicas para una economía de bajas emisiones. Ese es el papel de la innovación y la regulación. Sin embargo, la fragmentación de los objetivos políticos en naciones, sectores, tecnologías, casos de aplicación, grupos de consumidores, conjuntos territoriales, etc., dificulta el establecimiento de este tipo de coordinación orientada por la eficiencia.

Otro mecanismo lo ofrece el mercado europeo de emisiones, ETS (por sus siglas en inglés), creado en 2005. En este sistema participan el sector energético y la industria y funciona mediante un corredor de precios máximo-mínimo. Para los demás sectores, transporte, residencial y agro, se acordaron objetivos separados en la Unión Europea, (UE). El concepto de eficiencia del ETS se basa en la reducción de emisiones con los menores costos, independientemente de las tecnologías, sectores, emisiones y ubicaciones. Para ello, se establece la cantidad de emisiones permitida anualmente para todo el sistema. Bajo este esquema, se critica la fijación de metas nacionales o por sectores porque afecta el criterio de la eficiencia de los costos y porque otros efectos, como el llamado efecto lecho de agua (*waterbed effect*), pueden desplazar las emisiones en lugar de eliminarlas. Al incluir nuevos sectores en este tipo de mercados, se tiene la expectativa de incrementos en los costos de los certificados de emisiones, lo que puede encarecer la producción en esos sectores y provocar su eventual reubicación en otras regiones. Por estas razones, los sistemas basados en energías renovables son criticados desde la perspectiva económica tradicional, pues encarecen innecesariamente la protección climática frente a reducciones que pueden lograrse por otros medios.

El Acuerdo de París de 2015 sentó las bases para la creación de un acuerdo internacional que coordine la acción climática, del que se derivan los objetivos nacionales de reducción de emisiones. La producción centralizada y a gran escala del sistema energético basado en combustibles fósiles ha creado dependencias de trayectoria que bloquean la posibilidad de cambiar a otras alternativas tecnológicas, debido a factores como las economías de escala y el aprendizaje tecnológico. A través del tiempo se han creado grandes complejos industriales y regulaciones energéticas asociadas, que garantizan el éxito de los sectores establecidos. La perspectiva evolucionista del sistema para la transición energética pretende desincentivar a los sectores dominantes e incentivar a los nuevos participantes en el sector de las energías renovables. Las principales alternativas para las rutas que pueda tomar el desarrollo de las políticas públicas para cambiar la dependencia de la trayectoria bajo esta perspectiva son su modificación (por

ejemplo, mediante el uso de subvenciones para la energía solar fotovoltaica) y la ruptura y la transformación global de todas las infraestructuras relacionadas.

La creación de subvenciones temporales (no permanentes) para las fuentes renovables de energía incentiva los efectos dinámicos del escalado tecnológico, relacionado con las curvas de experiencia; y los esquemas con pagos decrecientes por la energía producida incentivan adicionalmente el consumo (y con ello el ingreso de las tecnologías al mercado). Una característica importante de estos mecanismos es que estos pagos pueden ajustarse en función del tiempo para controlar adecuadamente los rendimientos económicos respectivos sin afectar negativamente el despliegue de las tecnologías y la expansión de su uso.

Para la economía tradicional, las subvenciones pueden conducir a situaciones de acaparamiento del conocimiento tecnológico. Sin embargo, un análisis de las curvas de experiencia de las tres últimas décadas muestra que esto no ha ocurrido ni en el caso de la energía solar fotovoltaica ni en el de la eólica. Esto no significa que vaya a ser así para todas las tecnologías energéticas en el futuro. Un contraejemplo reciente es el de las centrales combinadas de calor y potencia, en las que el uso de tecnologías maduras no ha permitido una reducción apreciable y sostenida de sus costos. Para otros autores, el instrumento del mercado de emisiones sería suficiente para implementar la transición energética o alcanzar los objetivos climáticos. Sin embargo, ese instrumento ignora muchos otros aspectos del enfoque evolucionista de la innovación, como evitar la formación de dependencias de trayectoria. Por ello, se recomienda incorporar otros instrumentos complementarios. En las etapas iniciales de la transición energética, algunos países han introducido esquemas tarifarios a largo plazo para incentivar el uso generalizado de las fuentes renovables y sus tecnologías. Este tipo de medidas ha afectado las tarifas de la energía eléctrica para todos los usuarios finales, que al menos se han duplicado entre 2000 y la actualidad en países como Alemania, (Strom-Report, 2026).

En general, el objetivo es reducir la densidad de la regulación en este ámbito político y aumentar la eficacia y la eficiencia reguladoras. En resumen, se trata de establecer una combinación coordinada de instrumentos mediante una regulación e intervenciones políticas y administrativas conformes con el mercado. Las interacciones dentro del sistema y las normas concretas para la asignación del suministro de energía al sistema son el resultado de una malla de interrelaciones e influencias que incluyen tres componentes: el diseño normativo del régimen de emisiones de CO₂, las condiciones para la subvención y remuneración de las fuentes de energías renovables y las condiciones situacionales (específicas).

3. Políticas orientadas por misiones para la transición energética

El actual sistema energético mundial se basa en una estructura centrada en la explotación de los recursos fósiles y, en algunos países, de la energía nuclear. Este sistema energético se caracteriza por esquemas de producción centralizada y a gran escala, con sus correspondientes cadenas logísticas de transporte y distribución. Los procesos de transición energética pretenden sustituir gradualmente el uso de esos recursos de origen fósil mediante la expansión de las fuentes renovables de energía.

El cambio en las estructuras de la economía energética promovido por actuales los procesos de transición energética se enfrenta, por lo tanto, a importantes retos políticos y económicos:

- El sector energético actual se caracteriza por inversiones intensivas en capital con períodos de vida útil muy largos con pocos y grandes actores consolidados.
- Estos períodos de vida útil de los sistemas de suministro energético superan los períodos normales de las administraciones políticas nacionales y locales.
- Las decisiones de política energética de los gobiernos nacionales tienen mayor impacto en el sistema energético a mediano y largo plazo.

- Las decisiones políticas a corto plazo no suelen tener los efectos deseados; incluso, en algunos casos, son contraproducentes.
- Debido al desarrollo y despliegue de las nuevas tecnologías, los ciclos de innovación y de inversión en el sistema energético son más extensos que en otros sectores.
- La fiabilidad del suministro energético debe seguir garantizándose a través de sistemas basados en las fuentes renovables de energía, lo que exige mayores capacidades instaladas de generación, almacenamiento y transferencia para garantizar la estabilidad del suministro, simultáneamente con ajustes en el uso del suelo y las condiciones del ordenamiento territorial.

Debido a estas características, no es realista asumir que el sistema energético se pueda direccionar de forma centralizada y exclusiva desde el nivel político. A nivel global, actualmente se presentan problemas para alcanzar acuerdos políticos para la transición energética en la mayor parte de los países, pues se ha generado polarización en pro y en contra de las medidas de protección climática. Así, es necesario promover mecanismos amplios de participación que permitan tomar decisiones comprometidas y responsables para implementar las modificaciones requeridas a largo plazo, (Fabra, 2021).

Ante este tipo de grandes retos y transformaciones sociales, el enfoque de desarrollo de políticas públicas orientadas por misiones (POM) en el ámbito del desarrollo sostenible y de la transición energética ofrece ventajas y características adecuadas, (Mendonça et al., 2018; Miedzinski et al., 2019). Este enfoque busca establecer políticas verticales para la elección de problemas, en lugar de sectores o tecnologías, así:

- Incentiva la cocreación de los mercados, en contraste con la definición de mercados del enfoque convencional.
- Fomenta la vinculación de todos los actores dispuestos a participar en el sistema, en contraste con el enfoque convencional que se enfoca en seleccionar a los actores ganadores.
- Acepta la incertidumbre como parte de los procesos de transformación, comparativamente con el enfoque tradicional, que implica aversión a asumir riesgos.
- Promueve establecer una inclinación en la dirección buscada para incentivar la implementación; no mantiene simplemente las condiciones de nivelación tradicionales.

Además, las políticas públicas orientadas por misiones promueven la integración de los Objetivos del Desarrollo Sostenible como parte de las nuevas estrategias industriales. La construcción y aplicación eficaz de este tipo de estrategias fomenta una cultura de la experimentación y la asunción de riesgos por parte de las instituciones públicas. Estas estrategias industriales orientadas por misiones deben ser ambiciosas, fomentar la participación pública amplia y atraer inversiones intersectoriales, sin dejar de centrarse en objetivos concretos y medibles.

Del mismo modo, las políticas orientadas por misiones permiten incorporar los aprendizajes que tienen lugar en el proceso de despliegue de las tecnologías, y, a través de la reflexión y el análisis sobre lo aprendido, nutren el proceso de implementación de las políticas, (Vazquez & Hallack, 2018). Este es un componente relevante para la transición energética, pues en las distintas etapas de implementación hay una multiplicación simultánea de los costos de aprendizaje en múltiples tecnologías. Si la transición energética ocurre al mismo tiempo en muchas regiones o países, esos costos del aprendizaje se distribuyen. En contraste, si se implementa una transición energética acelerada, esos costos se concentran en las naciones que asumen ese rol pionero, lo que también puede conducir a problemas de aceptación social para el proceso.

El papel de la investigación y la innovación en la transición energética se centra en el desarrollo de tecnologías, instrumentos de política ambiental, herramientas de análisis, concepciones de gobernanza y en la implementación de proyectos piloto, (Kern et al., 2022). El enfoque de las políticas de investigación e innovación orientadas por misiones ofrece una herramienta de articulación de estos componentes y permite canalizar sus contribuciones como parte de la transición energética como un proceso sistémico.

Esta sección se complementa con los análisis de las consecuencias en el mediano y largo plazo previstas para el nuevo sistema energético, cuando se implementen consecuente y sistémicamente los procesos de transición energética, lo que se aborda en la siguiente sección.

4. Consecuencias sistémicas de la transición energética

La determinación de las condiciones marco (constitucionales), las motivaciones políticas y los objetivos de la transición energética tienen consecuencias en el sistema energético y en la economía nacional. Estas consecuencias se hacen más evidentes en la medida en que se avanza en la implementación de los procesos de transición energética. En algunos países, estas consecuencias pueden no haberse identificado convenientemente en las etapas tempranas de implementación de la transición, lo que alimenta en parte las discusiones políticas posteriores que interfieren con el desarrollo del proceso. Por estas razones es necesario analizar ampliamente las eventuales consecuencias de la transición energética en la conformación del nuevo sistema energético, lo que se presenta en esta sección desde una perspectiva global.

Se cuenta hoy, globalmente, con un grupo de tecnologías con altos niveles de madurez tecnológica, TRL (por sus siglas en inglés) y factibilidad para su implementación en la transición energética, que incluyen:

- Instalaciones de energía solar fotovoltaica.
- Plantas de energía eólica en tierra firme y costa afuera.
- Plantas operando con bioenergía.
- Plantas para la transformación de la energía hidráulica (inclusive las tecnologías a filo de agua, sin represamiento).

Otras tecnologías se encuentran en desarrollo y podrán implementarse mediante economías de escala en etapas posteriores de la transición energética, estas son, principalmente:

- Plantas a partir de energía geotérmica.
- Utilización de la energía mareomotriz y oceánica.

La implementación de todas esas tecnologías depende de las condiciones y de los potenciales geográficos, lo que contribuye en la configuración de múltiples combinaciones para establecer sistemas híbridos y las mezclas óptimas para la matriz energética en cada país:

- La energía hidráulica ha sido utilizada intensivamente y en gran escala en algunas regiones. A pesar de la extensa vida útil de estas tecnologías y su operación sin emisiones de CO₂, en la actualidad se han manifestado críticas y prevenciones sociales ante la construcción de grandes proyectos de energía hidráulica por motivos ambientales y de riesgos asociados con el represamiento del agua, (Scheidel & Sorman, 2012). El enfoque tecnológico se ha centrado más recientemente en los aprovechamientos a través de pequeñas centrales hidráulicas, que hacen uso de los flujos de agua sin su represamiento (a filo de agua).
- La energía a partir de la biomasa se ha utilizado históricamente y de forma generalizada en todas las regiones. Este tipo de energía hace parte actualmente de la oferta de energía firme de muchos países y ofrece soluciones y respaldo en sectores y áreas que cuentan con disponibilidad de biomasa, especialmente la de origen residual, en sectores como el forestal, el agropecuario y la industria procesadora de alimentos. También se dispone del potencial de los residuos sólidos urbanos, que cuentan con fracciones altas de materia orgánica. No es previsible el crecimiento y la participación porcentual elevada de la biomasa con fines energéticos a nivel mundial en el futuro, debido a las consideraciones ambientales relacionadas con la disponibilidad y el uso de la tierra y por la competencia con su uso prioritario en la alimentación. Algunos desarrollos en los últimos años han sido cuestionados por no cumplir con los criterios de sostenibilidad, (Baasch, 2021; Speich & Ulli-Beer, 2023), entre otros, al no haberse limitado la producción de bioenergía exclusivamente al uso de la biomasa residual. Esto ocasionó, en algunos casos, la pérdida de zonas protegidas ecológicamente por la expansión de monocultivos

como el maíz, y por el uso asociado de agroquímicos que afectan los suelos y las aguas subterráneas. Discusiones similares en torno al cumplimiento de los criterios de sostenibilidad se han presentado en países asiáticos como Malasia e Indonesia, que han intensificado la producción de aceite de palma durante varias décadas. Los desarrollos recientes en el área de la bioenergía se han asociado al desarrollo de conceptos de biorrefinerías, que pueden combinar las ventajas de la producción de insumos químicos, combustibles y energía térmica y eléctrica a partir de plataformas tecnológicas especiales, (Takeda et al., 2022).

- Las tecnologías para el aprovechamiento de la energía eólica se diferencian según su ubicación en tierra firme (*onshore*) o costa afuera (*offshore*). La implementación de estas tecnologías depende de las condiciones geográficas por la ubicación, y locales, por las restricciones específicas para los flujos de viento. Los desarrollos recientes han permitido una disminución alta de los costos nivelados de la electricidad producida (LCOE). Aunque la utilización directa de áreas de suelo para la instalación de los parques eólicos no es elevada, ya se han presentado casos de rechazo social asociados a los impactos visuales en el paisaje, (Jefferson, 2018), otros relacionados con impactos ambientales en relación con las migraciones de aves o las zonas de pesca y tensiones ocasionadas por las comunidades locales, en muchas ocasiones étnicas.
- La energía solar fotovoltaica ha contado con un desarrollo y despliegues tecnológicos intensivos durante las últimas dos décadas, lo que ha permitido la mayor disminución de los costos dentro de las tecnologías de las energías renovables. Los requerimientos de área para estas instalaciones no son significativos globalmente y puede hacerse uso de las áreas de los techos de las propias edificaciones. Esta tecnología ofrece las expectativas más altas de implementación a nivel mundial para la transición energética y constituye uno de sus pilares tecnológicos.

4.1 Dependencia geográfica de las fuentes renovables de energía

Los potenciales de las fuentes renovables de energía son en gran proporción dependientes de su ubicación geográfica. Esta condición exige que se amplíe la red eléctrica para permitir el intercambio de electricidad entre regiones con potenciales de fuentes diversas. Esta exigencia técnica se fundamenta en consideraciones económicas, ya que es más eficiente ubicar las plantas de producción de electricidad directamente en las áreas con los mayores potenciales y transportar la energía mediante nuevas infraestructuras de redes eléctricas, que producirla cerca de los centros de mayor demanda energética, pero con menores potenciales de las fuentes de energía renovable y de los factores de uso de las plantas para su transformación, (Spielhofer et al., 2023).

4.2 Dependencia temporal de las fuentes renovables de energía

La dependencia de las condiciones climáticas de las fuentes de energía solar y eólica las hacen variables en el tiempo y en los niveles de potencia producida. Estos pueden variar entre 0 y 100 % en períodos cortos de días e incluso de pocas horas y minutos. Esta condición implica que deben implementarse plantas con mayor capacidad nominal para garantizar los requerimientos de la demanda energética bajo esas condiciones variables de las fuentes renovables. En contraste, durante los períodos de plena disponibilidad de las fuentes renovables se producen excesos en la oferta de energía, comparativamente con la demanda. Se presentan así 3 consecuencias para el nuevo sistema energético:

- Se requieren capacidades instaladas mucho mayores, comparativamente con la electricidad generada.
- A pesar de esa gran capacidad instalada, se presentan períodos de tiempo en los que estas plantas no producen electricidad.
- Se presentan otras afectaciones técnicas en la operación de la red eléctrica como la tensión, ocasionados por la variación temporal en la producción de la electricidad.

Las opciones de solución a estos retos técnicos por la variabilidad de las fuentes renovables de la energía solar y eólica se clasifican en cinco grandes componentes:

1. La desconexión total o parcial de las plantas de producción de electricidad con energía solar fotovoltaica o eólica es la alternativa más simple y la dominante actualmente por su facilidad de implementación y bajos costos. Se estima que se continuará utilizando por un período adicional de entre 5 a 10 años.
2. El intercambio de electricidad entre regiones o países vecinos, lo que requiere que se cuente con la infraestructura necesaria de redes eléctricas.
3. La gestión de la demanda, DSM (por sus siglas en inglés), ofrece alternativas que no se contemplaban en el funcionamiento de los sistemas energéticos convencionales (centrados en la oferta). Estas medidas deben realizarse sin comprometer los niveles de desempeño de los sistemas productivos ni los niveles de confort para los consumidores finales.
4. El almacenamiento de la energía durante los períodos de exceso en la oferta y su posterior consumo en los períodos de necesidad. Esta es la opción con la mayor factibilidad de desarrollo técnico para asumir el reto de la variabilidad de las fuentes renovables de energía, aunque los costos tecnológicos para su implementación son aún altos, (Huang et al., 2023).
5. El consumo adicional de electricidad y el acoplamiento entre sectores permiten utilizar la energía producida en los períodos de exceso en la oferta en nuevas aplicaciones, o para acoplarla con el consumo en los demás sectores energéticos del transporte y la energía térmica. Esta opción abre posibilidades para implementar esquemas industriales con demanda flexible de electricidad, que pueden operar con bajos costos energéticos en función de los excesos de energía producidos, (Pagnier & Jacquod, 2018).

La selección de las opciones se hace tomando en cuenta las condiciones marco para la transición energética y las condiciones concretas de la aplicación en cada contexto. La opción 1 es la más económica en las etapas iniciales de implementación de la transición energética, cuando los niveles de participación en el sistema y de producción eléctrica con las fuentes renovables son aún bajos.

Se requiere, además, avanzar en la digitalización del sistema para su gestión adecuada con el uso de las fuentes variables de energía a través del desarrollo de redes inteligentes, plantas virtuales de potencia, inteligencia artificial y tecnologías de la información, (Valdes et al., 2019).

El desarrollo de la interconexión entre las regiones para intercambiar electricidad es un componente crítico para la transición energética porque demanda inversiones y tiempos de implementación altos.

El hidrógeno desempeñará también un papel importante de vector energético hacia el futuro en la solución de estos retos técnicos, porque permite su utilización en todos los sectores energéticos, cumple una función de almacenador intermediario de la energía y permite la producción de otros combustibles sintéticos derivados.

4.3 Menores escalas de producción en el sistema energético distribuido

La generación de electricidad en el sistema energético tradicional ha estado dominada en la mayor parte de los países por un grupo pequeño de plantas industriales a gran escala y, por tanto, ha estado bajo el control de unas pocas grandes empresas de la industria energética, normalmente a través de oligopolios. En cambio, la generación de electricidad a partir de las fuentes renovables de energía se caracteriza por un gran número de centrales de distintos tamaños, con capacidades promedio en el orden de diez veces menores que las centrales eléctricas convencionales, y por una cantidad de empresas, comunidades y agentes diferentes que pueden construir, financiar y explotar estas centrales, (Valencia et al., 2021).

La industria energética del futuro será por ello mucho más pequeña desde el punto de vista técnico y mucho más compleja desde el punto de vista económico y social que en el pasado. Estas características han sido utilizadas para establecer algunas de las motivaciones políticas para realizar la transición energética, que incentivan la participación abierta de actores en el sistema energético con esquemas de productores y consumidores simultáneamente

(prosumidores), especialmente a través del uso de microrredes eléctricas, (Dimou & Vakalis, 2022; Lode et al., 2022), bajo esquemas asociativos denominados comunidades energéticas.

4.4 El ordenamiento territorial y la presencia física de las tecnologías de las energías renovables

Los requerimientos de área de suelos para la instalación de las plantas operando con las fuentes renovables de energía son mayores comparativamente con las áreas ocupadas por las plantas actuales de transformación de los combustibles fósiles, (Amigues & Moreaux, 2019). Aun así, los requerimientos totales de área no son un criterio significativo a nivel nacional. La presencia física de los parques eólicos, especialmente, sí ha generado controversias en algunos lugares, debido a la afectación del paisaje, (Salak et al., 2022). Otras preocupaciones se refieren a efectos en el medio natural, (Weng et al., 2020), como la migración de aves y las regiones de pesca en el mar. En el caso de la bioenergía, se deben mantener criterios de control para garantizar la obtención de los recursos de biomasa bajo los criterios de sostenibilidad exigidos, (McManamay et al., 2019). Los grandes proyectos de energía hidráulica con represamientos han recibido un creciente rechazo social por afectaciones en los ecosistemas, la biodiversidad, la creación de microclimas y las variaciones de los caudales, aguas abajo de los lugares del represamiento.

Para la reducción de impactos sobre el paisaje y la utilización del espacio se recomienda la utilización de techos de edificaciones para la instalación de paneles solares y sistemas fotovoltaicos como soluciones individuales, (IPSE, 2019). Los grandes proyectos fotovoltaicos centralizados deben tener en cuenta no afectar el paisaje en la instalación de los equipos. También se debe velar por la menor remoción posible de cobertura vegetal, que es otro tipo de impacto potencial sobre el paisaje debido a la instalación de equipos que requieren áreas despejadas. Asimismo, se deben considerar factores de impactos ambientales como la competencia por recursos ecosistémicos en zonas cercanas, y los posibles conflictos de usos del suelo establecidos en instrumentos de planeación y ordenamiento territorial locales, la participación de las comunidades en consultas y los posibles conflictos con áreas autóctonas o de importancia cultural, (ANLA, 2017b).

Los proyectos hidroeléctricos cuentan con un área de influencia considerable al modificar una fuente hídrica, trayendo posibles impactos ambientales. Para el análisis de las zonas de influencia se deben tener en cuenta factores del medio abiótico, relacionadas con los componentes hidrológicos, geológicos, geotécnicos y atmosféricos; factores del medio biótico, como la flora, la fauna o la hidrobiota; el medio socioeconómico, entendiendo la demografía y las condiciones espaciales, culturales, arqueológicas y político-administrativas, (ANLA, 2017a).

Los proyectos eólicos generan un impacto en las condiciones espaciales, debido al área que requieren para su instalación y funcionamiento, así como en las líneas de transmisión, (Garavito Téllez, 2020). Estos impactos se generan principalmente en el proceso de construcción y en la operación de los parques eólicos, generando a nivel terrestre el efecto de barrera ecosistémica por la falta de continuidad del paisaje (sobre todo por la cimentación de la estructura de las torres y las zonas de los alrededores), impactos por el ruido generado a raíz de las torres y aerogeneradores así como a nivel aéreo, la perturbación a las comunidades de aves y murciélagos para acceder a lugares de incubación de especies migratorias, o la posible colisión o electrocución por choques con la infraestructura de las líneas de transmisión. Durante la construcción de la infraestructura se pueden evidenciar impactos como la erosión por movimientos de tierras o contaminación del aire por material utilizado en la construcción. Se deben analizar los posibles impactos generados en las zonas cercanas a los parques eólicos, así como las condiciones bióticas y ecosistémicas para evitar estos conflictos, permitiendo una distancia adecuada a zonas de importancia ecológica.

En los proyectos eólicos costa afuera se deben considerar para su funcionamiento los periodos de retorno de eventos como tormentas y el oleaje, la velocidad de las olas, así como la altura y modelos hidrológicos para implantar la estructura adecuada en estos proyectos, (Bolívar Carbonell, 2019).

En general deben tenerse en cuenta para proyectos energéticos para la transición energética las posibles afectaciones ambientales a áreas de importancia ecosistémica, zonas excluidas, impactos en áreas de influencia, la ejecución sostenible de la construcción y operación del proyecto, así como una evaluación socioespacial y político-administrativa para evitar posibles conflictos sociales, económicos o asociados a cambios en los usos del suelo. Asimismo, estos proyectos deben implantarse en zonas donde sea viable su construcción y las condiciones ambientales y atmosféricas permitan su ejecución.

5. Focos críticos de investigación y desarrollo para la transición energética

Las consecuencias de la transición energética en los nuevos sistemas energéticos descritos en la sección anterior tienen un carácter transversal y general. En esta sección se complementa ese análisis a través de la consideración de los principales focos técnicos y sus retos.

5.1 La transición eléctrica

Los retos para el suministro de electricidad exigen garantizar la estabilidad, fiabilidad y seguridad en el suministro, no solamente por la eventual salida de operación de todos los equipos eléctricos, sino porque se afectan otros sistemas de comunicación y automatización y el suministro de otros recursos como el gas y el agua. Además, se deben tener en cuenta los efectos en el sistema energético actual debido la salida de fracciones importantes de la carga de potencia de soporte mediante las centrales eléctricas convencionales.

Una consecuencia sistémica de la expansión de las energías renovables en relación con las condiciones marco de seguridad del suministro y de conformidad con la economía de mercado es que las reglas del mercado para las centrales eléctricas convencionales deben rediseñarse a largo plazo para que estas centrales puedan operar de forma rentable en la magnitud que se requiera. Esto brinda respaldo al nuevo sistema energético basado en las energías renovables.

La expansión de las energías renovables conducirá necesariamente a la caída de los precios de la electricidad en las bolsas y con ello a la caída de la rentabilidad de todas las centrales eléctricas convencionales. Es inevitable que, en el curso de la transición energética, al menos bajo el diseño actual del mercado eléctrico, las ganancias de los operadores de las centrales eléctricas convencionales disminuyan. Se debe tener en cuenta, adicionalmente, que al encarecerse las emisiones de carbono se puede causar la salida de operación de estas centrales por motivos económicos y no políticos, lo que implicaría que no se paguen compensaciones.

La sustitución de la producción de electricidad a partir de las fuentes fósiles genera impactos económicos, laborales y fiscales en las zonas donde se realiza la explotación y transformación de las fuentes fósiles para la producción de electricidad. Esta consecuencia exige la creación de economías alternativas, lo que parcialmente ha dado origen al término de las transiciones energéticas *justas*, (Abraham, 2017; McCauley & Heffron, 2018).

5.2 La transición del transporte

La transición eléctrica ofrece la base para avanzar en la transición del transporte mediante la sustitución del uso de los combustibles de origen fósil en los vehículos con motores de combustión interna por los vehículos eléctricos. Para el transporte aéreo y marítimo se requiere desarrollar otras alternativas tecnológicas diferentes al uso de la electricidad, entre las que se cuenta con los biocombustibles, el combustible sostenible para aviación, SAF (por sus siglas en inglés) y los combustibles sintéticos producidos a partir del hidrógeno. Las celdas de combustible también pueden implementarse en aplicaciones de transporte vehicular, especialmente para el transporte de carga pesada y en las flotas de buses de larga distancia.

5.3 La transición de la energía térmica (o de calor)

Los requerimientos energéticos de calor de baja temperatura (con baja exergía), como la usada para el calentamiento de agua, pueden sustituirse sin dificultades mediante calor producido a partir de electricidad. En estas aplicaciones de calentamiento con bajas temperaturas se ha establecido el uso preferencial de las bombas de calor por su mejor desempeño energético, (Terry & Galvin, 2023). Las aplicaciones que exigen calor de media y alta temperatura, como los procesos industriales, representan retos de mayor escala para la sustitución de los combustibles fósiles. En estas aplicaciones es factible la utilización de la biomasa, los biocombustibles, el hidrógeno y los combustibles derivados.

La transición térmica exige la realización de análisis de optimización para el uso de las fuentes de alta exergía, como la electricidad y la potencia mecánica, para incrementar la eficiencia en la cadena de transformación hasta los usos finales de la energía, manteniendo los niveles requeridos del desempeño industrial y del confort humano. El acoplamiento de los sectores energéticos y las medidas que permitan continuar produciendo una fracción de la electricidad mediante el uso de los ciclos combinados sirven como recursos estratégicos y competitivos, comparativamente con el almacenamiento de energía, y hacen más eficiente en costos a la transición energética.

5.4 Integración y eficiencia del sistema energético

El mejoramiento de la eficiencia energética es una medida básica y transversal para el sistema, que debe implementarse desde las etapas iniciales de los procesos de transición. El mejoramiento de la eficiencia permite atender especialmente el consumo final de energía por parte de los usuarios, (Decuyper et al., 2022). Estas medidas representan un energético ‘escondido’, que contribuye de forma apreciable a lograr las metas establecidas para el consumo energético y para la disminución de las emisiones de dióxido de carbono.

Los conceptos de la conversión de la potencia eléctrica a calor, PtH (por sus siglas en inglés), o a otros productos y usos, PtX (por sus siglas en inglés), permiten implementar acciones de acoplamiento entre los sectores energéticos, (Gea-Bermúdez et al., 2021; Naegler et al., 2021; Nastasi & Lo Basso, 2016). La hibridación del sistema con sus infraestructuras permite la flexibilización de los usos entre sectores; también sirve de respaldo cuando no hay suficiente electricidad renovable en el sistema. Finalmente, la integración del sector energético demanda una visión sistémica para articularlo simultáneamente en el contexto social, económico y ambiental.

5.5 El hidrógeno y los combustibles sintéticos

La dependencia espacial y temporal de las fuentes renovables de energía es un factor decisivo para las rutas tecnológicas de la actual transición energética. La producción de hidrógeno verde a partir del agua y la electricidad renovable ofrece una alternativa de almacenamiento para las fuentes renovables variables de energía, especialmente la solar y la eólica. Esta forma de almacenamiento químico permite utilizar posteriormente el hidrógeno como un vector energético a través de tres grandes grupos de aplicaciones, identificadas como la transformación de la potencia eléctrica a otros usos, PtX (por sus siglas en inglés), así:

- El almacenamiento de electricidad (PtX, potencia – X – potencia): mediante el uso posterior del hidrógeno para la generación nuevamente de electricidad, por ejemplo, a través de combustión en turbinas o su uso en celdas de combustible en aplicaciones de transporte.
- Gestión de la demanda energética (potencia para procesos dinámicos): para el uso del hidrógeno a través de los nuevos esquemas para la gestión de la demanda energética, que permite utilizar los excesos de la electricidad renovable en los períodos en que se presenta déficit en su generación.
- Insumo en procesos de producción: corresponde al uso del hidrógeno como insumo en la producción de derivados como los combustibles sintéticos (o electrocombustibles) y otros, como el amoníaco y los fertilizantes verdes.

Estas características de la transición energética ofrecen una plataforma apropiada para el desarrollo de la economía del hidrógeno en un rango amplio de aplicaciones, (Haugen et al., 2022; Nastasi & Lo Basso, 2016; Takeda et al., 2022).

6. Indicadores de desempeño para la implementación de la transición energética

De forma coherente con los objetivos de la política energética, los indicadores del sistema energético sirven para evaluar el desempeño en las tres dimensiones principales, social, económica y ambiental, durante la transición energética, (Bárcena Ibarra et al., 2020; Singh et al., 2019; Valencia et al., 2021; Yu et al., 2020). La International Atomic Energy Agency presenta varios de los indicadores de desarrollo sostenible más utilizados, que pueden clasificarse según la dimensión abordada, (International Atomic Energy Agency, 2005).

Tabla 6-1. Indicadores de desempeño para la implementación de la transición energética.

Indicadores	Definición	Componentes de construcción
Tasa de cubrimiento del suministro eléctrico	Porcentaje de hogares (o población) con acceso a suministro eléctrico.	■ Hogares (o población) con acceso a suministro eléctrico. ■ Número total de hogares (o población).
Fiabilidad	Se mide en función de la interrupción del abastecimiento eléctrico por año. Este indicador se encuentra entre 15 – 20 min/a en países europeos. Estos son valores de referencia que deben mantenerse bajo las condiciones de operación con el nuevo sistema energético.	■ Estadísticas de fallos y cortes del suministro del pasado.
Asequibilidad	Porcentaje del ingreso del hogar gastado en energía eléctrica y combustibles	■ Promedio del gasto por hogar en combustibles y electricidad. ■ Ingreso de los hogares (total y para el 20 % de los hogares de menores ingresos.)
Disparidades	Uso de energía por hogares para cada nivel de ingreso.	● Uso de energía por hogares por quintiles de niveles de ingresos.
Intensidad energética	La energía requerida para la producción en un país. En este caso, se estima el consumo final de energía del país para un año y se pondera respecto al Producto Interno Bruto anual, en precios constantes para un año de referencia.	■ Consumo final de energía eléctrica a nivel nacional. ■ Producto Interno Bruto en valores de referencia para un año específico
Consumo de energía primaria (CEP)	Consumo de energía primaria total en el país anualmente.	■ Consumo total de energía primaria en el país durante un año.

Indicadores	Definición	Componentes de construcción
Consumo de energía per cápita	Consumo total de energía final por habitante.	- Consumo final de energía del país. - Población total.
Uso final de energía	Consumo de energía por sectores económicos consumidores (industrias manufactureras, agropecuarios, transporte, comercial, residencial y servicios públicos).	Consumo de energía por sectores económicos y consumo total de energía final.
Precios	Promedio de precio normalizado según el tipo de energía (en dólares por kWh).	Precios de energía (con y sin impuestos y subsidios).
Importaciones	Dependencia de importación energética neta	- Importación de energía. - Total de oferta primaria de energía.
Proporción de fuentes limpias de energía	Proporción de fuentes de energía no emisoras de gases efecto invernadero sobre el total de la generación de energía.	Oferta primaria, generación eléctrica y consumo final de energía no emisora de gases efecto invernadero y total.
Proporción de fuentes renovables de energía	Proporción de fuentes renovables de energía sobre el total de la generación de energía.	Oferta primaria, generación eléctrica y consumo final de energía renovable y total.
Consumo de energía per cápita	Consumo total de energía final por habitante.	- Consumo final de energía del país. - Población total.
Emisiones de CO₂ por producción de energía y uso per cápita.	Emisiones de gases efecto invernadero por producción de energía y uso per cápita.	- Emisiones por producción de energía y uso de esta. - Población.

Fuente: *International Atomic Energy Agency (2005)*

Luego del contexto internacional presentado en este capítulo para los procesos de implementación de la transición energética, en el siguiente capítulo se presenta un análisis integral de las condiciones del ordenamiento territorial en el país, que es un componente transversal de barreras y habilitadores para la adecuada implementación de los procesos de transición energética a nivel regional en Colombia.

Referencias bibliográficas

- Abraham, J. (2017). Just Transitions for the Miners: Labor Environmentalism in the Ruhr and Appalachian Coalfields. *New Political Science*, 39(2), 218–240. <https://doi.org/10.1080/07393148.2017.1301313>
- Amigues, J.-P., & Moreaux, M. (2019). Competing Land Uses and Fossil Fuel, and Optimal Energy Conversion Rates During the Transition Toward a Green Economy Under a Pollution Stock Constraint. *Journal of Environmental Economics and Management*, 97, 92–115. <https://doi.org/10.1016/j.jeem.2019.03.006>
- ANLA. (2017a). Términos de Referencia para la Elaboración del Estudio de Impacto Ambiental – EIA en Proyectos de Construcción y Operación de Centrales Generadoras de Energía Hidroeléctrica. *Agencia Nacional de Licencias Ambientales*. https://www.anla.gov.co/01_anla/normatividad/documentos-estrategicos/terminos-de-referencia
- ANLA. (2017b). Términos de Referencia para la Elaboración del Estudio de Impacto Ambiental – EIA en Proyectos de Uso de Energía Solar Fotovoltaica. *Agencia Nacional de Licencias Ambientales*. https://www.anla.gov.co/01_anla/normatividad/documentos-estrategicos/terminos-de-referencia
- Baasch, S. (2021). Energy Transition with Biomass Residues and Waste: Regional-Scale Potential and Conflicts. A Case Study from North Hesse, Germany. *Journal of Environmental Policy & Planning*, 23(2), 243–255. <https://doi.org/10.1080/1523908X.2021.1888701>
- Bárcena Ibarra, A., Samaniego, J., Peres Núñez, W., & Alatorre, J. E. (2020). *La Emergencia del Cambio Climático en América Latina y el Caribe: ¿Seguimos Esperando la Catástrofe o Pasamos a la Acción?* Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/45677/1/S1900711_es.pdf
- Bazilian, M. D. (2018). The mineral foundation of the energy transition. *The Extractive Industries and Society*, 5(1), 93–97. <https://doi.org/10.1016/j.exis.2017.12.002>
- Böhm, G., Doran, R., Rødeseike, A., & Pfister, H.-R. (2019). Pathways to Energy Transition: A Faceted Taxonomy. *International Studies of Management & Organization*, 49(3), 303–319. <https://doi.org/10.1080/00208825.2019.1623981>
- Bolívar Carbonell, M. (2019). *Lineamientos Metodológicos para la Ubicación de un Parque Eólico Offshore Asociados al Clima Marítimo y Condiciones Hidrodinámicas en el Departamento del Atlántico*. <http://hdl.handle.net/10584/10084>
- Chazel, S., Bernard, S., & Bencheikroun, H. (2023). Energy Transition Under Mineral Constraints and Recycling: A Low-Carbon Supply Peak. *Resource and Energy Economics*, 72, 101356. <https://doi.org/10.1016/j.reseneeco.2023.101356>
- Chen, C., Xue, B., Cai, G., Thomas, H., & Stückrad, S. (2019). Comparing the Energy Transitions in Germany and China: Synergies and Recommendations. *Energy Reports*, 5, 1249–1260. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2019.08.087>
- Cherp, A., Vinichenko, V., Jewell, J., Brutschin, E., & Sovacool, B. (2018). Integrating Techno-Economic, Socio-Technical and Political Perspectives on National Energy Transitions: A meta-theoretical framework. *Energy Research & Social Science*, 37, 175–190. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2017.09.015>
- Chien, F., Vu, T. L., Hien Phan, T. T., Van Nguyen, S., Viet Anh, N. H., & Ngo, T. Q. (2023). Zero-Carbon Energy Transition in ASEAN Countries: The Role of Carbon Finance, Carbon Taxes, and Sustainable Energy Technologies. *Renewable Energy*, 212, 561–569. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.04.116>

- Decuyper, R., Robaeyst, B., Hudders, L., Baccarne, B., & Van de Sompel, D. (2022). Transitioning to Energy Efficient Housing: Drivers and Barriers of Intermediaries in Heat Pump Technology. *Energy Policy*, 161, 112709. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2021.112709>
- Delafield, G., Donnison, C., Roddis, P., Arvanitopoulos, T., Sfyridis, A., Dunnett, S., Ball, T., & Logan, K. G. (2021). Conceptual Framework for Balancing Society and Nature in Net-Zero Energy Transitions. *Environmental Science & Policy*, 125, 189–201. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2021.08.021>
- Dimou, A., & Vakalis, S. (2022). Technoeconomic Analysis of Green Energy Transitions in Isolated Grids: The Case of Ai Stratis – Green Island. *Renewable Energy*, 195, 66–75. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.06.039>
- Fabra, N. (2021). The Energy Transition: An Industrial Economics Perspective. *International Journal of Industrial Organization*, 79, 102734. <https://doi.org/10.1016/j.ijindorg.2021.102734>
- Felder, F. A., Unel, B., & Dvorkin, Y. (2021). Modeling Strategic Objectives and Behavior in the Transition of the Energy Sector to Inform Policymaking. *The Electricity Journal*, 34(8), 107009. <https://doi.org/10.1016/j.tej.2021.107009>
- Freire-González, J., & Puig-Ventosa, I. (2019). Reformulating taxes for an energy transition. *Energy Economics*, 78, 312–323. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2018.11.027>
- Garavito Téllez, L. (2020). Impactos ambientales de los parques eólicos y líneas de transmisión de energía sobre la biodiversidad de áreas protegidas del Departamento de La Guajira-Colombia.
- Gea-Bermúdez, J., Jensen, I. G., Münster, M., Koivisto, M., Kirkerud, J. G., Chen, Y., & Ravn, H. (2021). The role of sector coupling in the green transition: A least-cost energy system development in Northern-central Europe towards 2050. *Applied Energy*, 289, 116685. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116685>
- Haugen, M. J., Flynn, D., Greening, P., Tichler, J., Blythe, P., & Boies, A. M. (2022). Electrification versus hydrogen for UK road freight: Conclusions from a systems analysis of transport energy transitions. *Energy for Sustainable Development*, 68, 203–210. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2022.03.011>
- Huang, W.-C., Zhang, Q., & You, F. (2023). Impacts of Battery Energy Storage Technologies and Renewable Integration on the Energy Transition in the New York State. *Advances in Applied Energy*, 9, 100126. <https://doi.org/10.1016/j.adapen.2023.100126>
- International Atomic Energy Agency. (2005). *Energy Indicators for Sustainable Development: Guidelines and Methodologies*. International Atomic Energy Agency. <https://www.iaea.org/publications/7201/energy-indicators-for-sustainable-development-guidelines-and-methodologies>
- IPSE. (2019). *Documento de Manejo Ambiental. Proyectos con Sistemas Fotovoltaicos*. https://ipse.gov.co/requisitos_formatos_y_guias/documentos/guia_manejo_ambiental/9_A_Gu%C3%ADa_manejo_ambiental_tipo_solares.pdf
- Jacques, P., Delannoy, L., Andrieu, B., Yilmaz, D., Jeanmart, H., & Godin, A. (2023). Assessing the economic consequences of an energy transition through a biophysical stock-flow consistent model. *Ecological Economics*, 209, 107832. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2023.107832>
- Jefferson, M. (2018) Safeguarding rural landscapes in the new era of energy transition to a low carbon future. *Energy Res. Soc. Sci.*, 37, 191–197 (2018).
- Kern, F., Peuckert, J., Lange, S., Ahmann, L., Banning, M., & Lutz, C. (2022). Designing Effective and Acceptable Policy Mixes for Energy Transitions: Countering Rebound Effects in German Industry. *Energy Research & Social Science*, 90, 102680. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2022.102680>

- Kim, S. K., & Park, S. (2023). Impacts of Renewable Energy on Climate Vulnerability: A Global Perspective for Energy Transition in a Climate Adaptation Framework. *Science of The Total Environment*, 859, 160175. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160175>
- Kolb, S., Müller, J., Luna-Jaspe, N., & Karl, J. (2022). Renewable Hydrogen Imports for the German Energy Transition – A Comparative Life Cycle Assessment. *Journal of Cleaner Production*, 373, 133289. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133289>
- Kuittinen, H., & Velte, D. (2018). *Mission-Oriented R&I Policies: Case Study Report Energiewende (Germany)*. https://research-and-innovation.ec.europa.eu/system/files/2018-02/mission_oriented_r_and_i_policies_case_study_report_energiewende-de.pdf
- Kullmann, F., Markewitz, P., Kotzur, L., & Stolten, D. (2022). The Value of Recycling for Low-Carbon Energy Systems - A Case Study of Germany's Energy Transition. *Energy*, 256, 124660. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124660>
- Lode, M. L., te Boveldt, G., Coosemans, T., & Ramirez Camargo, L. (2022). A Transition Perspective on Energy Communities: A Systematic Literature Review and Research Agenda. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 163, 112479. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112479>
- McCauley, D., & Heffron, R. (2018). Just Transition: Integrating Climate, Energy and Environmental Justice. *Energy Policy*, 119, 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.04.014>
- McManamay, R. A., DeRolph, C. R., Surendran-Nair, S., & Allen-Dumas, M. (2019). Spatially Explicit Land-Energy-Water Future Scenarios for Cities: Guiding Infrastructure Transitions for Urban Sustainability. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 112, 880–900. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.06.011>
- Mendonça, H. L., van Aduard de Macedo-Soares, T. D. L., & Fonseca, M. V. de A. (2018). Working Towards a Framework Based on Mission-Oriented Practices for Assessing Renewable Energy Innovation Policies. *Journal of Cleaner Production*, 193, 709–719. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.064>
- Mersch, M., Markides, C. N., & Mac Dowell, N. (2023). The Impact of the Energy Crisis on the UK's Net-Zero Transition. *IScience*, 26(4), 106491. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2023.106491>
- Miedzinski, M., Mazzucato, M., & Ekins, P. (2019). *A Framework For Mission-Oriented Innovation Policy Roadmapping for the Sdgs: The Case Of Plastic-Free Oceans* (Working Paper Series (IIPP WP 2019-03)). <https://www.ucl.ac.uk/bartlett/public-purpose/wp2019-03>
- Miller, C. A., Richter, J., & O'Leary, J. (2015). Socio-Energy Systems Design: A Policy Framework for Energy Transitions. *Energy Research & Social Science*, 6, 29–40. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2014.11.004>
- Müller, M., Schulze, M., & Schöneich, S. (2023). The Energy Transition and Green Mineral Value Chains: Challenges and Opportunities for Africa and Latin America. *South African Journal of International Affairs*, 30(2), 169–175. <https://doi.org/10.1080/10220461.2023.2230957>
- Naegler, T., Sutardhio, C., Weidlich, A., & Pregger, T. (2021). Exploring Long-Term Strategies for the German Energy Transition - A Review of Multi-Sector Energy Scenarios. *Renewable and Sustainable Energy Transition*, 1, 100010. <https://doi.org/10.1016/j.rset.2021.100010>
- Nastasi, B., & Lo Basso, G. (2016). Hydrogen to Link Heat and Electricity in the Transition Towards Future Smart Energy Systems. *Energy*, 110, 5–22. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.03.097>

- Pagnier, L., & Jacquod, P. (2018). How Fast Can One Overcome the Paradox of the Energy Transition? A Physico-Economic Model for the European Power Grid. *Energy*, 157, 550–560. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.05.185>
- Pingkuo, L., & Huan, P. (2022). What Drives the Green and Low-Carbon Energy Transition in China?: An Empirical Analysis Based on a Novel Framework. *Energy*, 239, 122450.
- Salak, B., Kienast, F., Olschewski, R., Spielhofer, R., Wissen Hayek, U., Grêt-Regamey, A., & Hunziker, M. (2022). Impact on the Perceived Landscape Quality Through Renewable Energy Infrastructure. A Discrete Choice Experiment in the Context of the Swiss Energy Transition. *Renewable Energy*, 193, 299–308. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.04.154>
- Scheidel, A., & Sorman, A. H. (2012). Energy Transitions and the Global Land Rush: Ultimate Drivers and Persistent Consequences. *Global Environmental Change*, 22(3), 588–595. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2011.12.005>
- Schischke, A., Papenfuß, P., Brem, M., Kurz, P., & Rathgeber, A. W. (2023). Sustainable Energy Transition and its Demand for Scarce Resources: Insights into the German Energiewende Through a New Risk Assessment Framework. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 176, 113190. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113190>
- Seddighi, S., Anthony, E. J., Seddighi, H., & Johnsson, F. (2023). The Interplay Between Energy Technologies and Human Health: Implications for Energy Transition. *Energy Reports*, 9, 5592–5611. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2023.04.351>
- Singh, H. V., Bocca, R., Gomez, P., Dahlke, S., & Bazilian, M. (2019). The Energy Transitions Index: An Analytic Framework for Understanding the Evolving Global Energy System. *Energy Strategy Reviews*, 26, 100382. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2019.100382>
- Speich, M., & Ulli-Beer, S. (2023). Applying an Ecosystem Lens to Low-Carbon Energy Transitions: A Conceptual Framework. *Journal of Cleaner Production*, 398, 136429. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136429>
- Spielhofer, R., Schwaab, J., & Grêt-Regamey, A. (2023). How Spatial Policies Can Leverage Energy Transitions – Finding Pareto-Optimal Solutions for Wind Turbine Locations with Evolutionary Multi-Objective Optimization. *Environmental Science & Policy*, 142, 220–232. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2023.02.016>
- Strom-Report. (2026). *Rückblick: Strompreisentwicklung in Deutschland seit 2000*. <https://strom-report.com/strompreisentwicklung/#:~:text=Der%20durchschnittliche%20Strompreis%20f%C3%BCr%20Privathaushalte,2022%20und%202023%20zu%20verzeichnen>
- Swilling, M., Nygaard, I., Kruger, W., Wlokas, H., Jhetam, T., Davies, M., Jacob, M., Morris, M., Robbins, G., Funder, M., Hansen, U. E., Olsen, K. H., Davy, E., Kitzing, L., Khan, B. S., & Cronin, T. (2022). Linking The Energy Transition And Economic Development: A Framework for Analysis of Energy Transitions in the Global South. *Energy Research & Social Science*, 90, 102567. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2022.102567>
- Takeda, S., Nam, H., & Chapman, A. (2022). Low-Carbon Energy Transition with the Sun and Forest: Solar-Driven Hydrogen Production from Biomass. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(58), 24651–24668. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.11.203>
- Terry, N., & Galvin, R. (2023). How Do Heat Demand and Energy Consumption Change when Households Transition from Gas Boilers to Heat Pumps in the UK. *Energy and Buildings*, 292, 113183. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113183>

- Tran, T. K., Chau, K. Y., Phan, T. T. H., Tran, K. N., Thuy, N. T. T., & Ngo, T. Q. (2023). Dynamic Association Between Energy Transition Technologies, Renewable Energy Production, Trade Openness, Green Investment, Carbon Tax, And Carbon Neutrality: Empirical Evidences from China. *Economic Research-Ekonomska Istraživanja*, 36(2). <https://doi.org/10.1080/1331677X.2023.2177700>
- Upham, P., Eberhardt, L., & Klapper, R. G. (2020). Rethinking the Meaning of “Landscape Shocks” in Energy Transitions: German Social Representations of the Fukushima Nuclear Accident. *Energy Research & Social Science*, 69, 101710. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2020.101710>
- Valayer, P. J., Vidal, O., Wouters, N., & van Loosdrecht, M. C. M. (2019). The Full Energy Cost of Avoiding CO₂: A Clean-Energy Booking Provision for a Vigorous Energy Transition. *Journal of Cleaner Production*, 237, 117820. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117820>
- Valdes, J., Poque González, A. B., Ramirez Camargo, L., Valin Fenández, M., Masip Macia, Y., & Dorner, W. (2019). Industry, Flexibility, and Demand Response: Applying German Energy Transition Lessons in Chile. *Energy Research & Social Science*, 54, 12–25. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2019.03.003>
- Valencia, F., Billi, M., & Urquiza, A. (2021). Overcoming Energy Poverty Through Micro-Grids: An Integrated Framework for Resilient, Participatory Sociotechnical Transitions. *Energy Research & Social Science*, 75, 102030. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2021.102030>
- Vazquez, M., & Hallack, M. (2018). The Role of Regulatory Learning in Energy Transition: The Case ff Solar PV in Brazil. *Energy Policy*, 114, 465–481. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.11.066>
- Wakiyama, T., Zusman, E., & Monogan, J. E. (2014). Can a Low-Carbon-Energy Transition Be Sustained in Post-Fukushima Japan? Assessing the Varying Impacts of Exogenous Shocks. *Energy Policy*, 73, 654–666. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2014.06.017>
- WEC. (2024). *Índice del Trilema Energético*. World Energy Council. <https://trilemma.worldenergy.org/>
- Weng, W., Becker, S. L., Lüdeke, M. K. B., & Lakes, T. (2020). Landscape Matters: Insights from the Impact of Mega-Droughts on Colombia’s Energy Transition. *Environmental Innovation and Societal Transitions*, 36, 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.eist.2020.04.003>
- Wiertz, T., Kuhn, L., & Mattissek, A. (2023). A Turn to Geopolitics: Shifts in the German Energy Transition Discourse in Light of Russia’s War Against Ukraine. *Energy Research & Social Science*, 98, 103036. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2023.103036>
- Yu, L., Xue, B., Stückerad, S., Thomas, H., & Cai, G. (2020). Indicators for Energy Transition Targets in China and Germany: A Text Analysis. *Ecological Indicators*, 111, 106012. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.106012>

Lista de siglas

Sigla	Descripción
ANLA	Autoridad Nacional de Licencias Ambientales
CCUS	Captura, Uso y Almacenamiento de Carbono (por sus siglas en inglés, <i>Carbon Capture, Utilization, and Storage</i>)
CEP	Consumo de Energía Primaria
CEPAL	Comisión Económica para América Latina y el Caribe
CO ₂	Dióxido de carbono
DSM	Gestión activa de la demanda (por sus siglas en inglés, <i>Demand-Side Management</i>)
ETS	Sistema de Comercio de Derechos de Emisión de la Unión Europea (por sus siglas en inglés <i>Emissions Trading System</i>)
IPCC	Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (por sus siglas en inglés, <i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>)
IPSE	Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas para Zonas No Interconectadas
LCOE	Costo nivelado de la energía (por sus siglas en inglés, <i>Levelized Cost of Energy</i>)
POM	Políticas Orientadas por Misiones
SAF	Combustible sostenible para aviación (por sus siglas en inglés, <i>Sustainable Aviation Fuel</i>)
TRL	Nivel de Madurez Tecnológica (por sus siglas en inglés, <i>Technology Readiness Level</i>)
UE	Unión Europea
WEC	Consejo Mundial de Energía (por sus siglas en inglés, <i>World Energy Council</i>)