
**LA TRANSICIÓN ENERGÉTICA COMO UN LÍMITE AL
DESARROLLO EN UN CONTEXTO DE
GLOBALIZACIÓN E INTERDEPENDENCIA**

TESIS

**Tesista: Lic. Especialista en Economía del Petróleo y el Gas Natural
AGUSTÍN J. REGUEIRA**

Director de tesis: LIC. ROBERTO PONS

Buenos Aires, 2024



MAESTRÍA INTERDISCIPLINARIA EN ENERGÍA

UNIVERSIDAD DE BUENOS AIRES

**CENTRO DE ESTUDIOS DE LA ACTIVIDAD REGULATORIA
ENERGÉTICA**

Resumen

La transición energética desde fuentes primarias fósiles hacia fuentes de energía descarbonizadas y sustentables en el tiempo se presenta en las primeras tres décadas del siglo XXI como la cuestión más relevante de la agenda global. Se observa una presión cada vez mayor desde diversos grupos de interés, que actúan principalmente en los países desarrollados del hemisferio norte, por acelerar la intensificación del uso de aquellas fuentes de energía comúnmente denominadas renovables, como por ejemplo la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA por sus siglas en inglés), organismo autárquico de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE). Este conjunto de organizaciones multilaterales e interdisciplinarias se caracterizan por estar conformadas tanto por estados miembro y observadores, así como también por entidades de la sociedad civil, como compañías multinacionales. La cuestión fundamental que se aborda en este trabajo radica en determinar si los tiempos tecnológicos y las posibilidades de las energías renovables son tales como para completar la transición energética en los plazos que la comunidad internacional se plantea, o bien, representarían un límite a las nociones de desarrollo que hoy prevalecen.

El estudio del tema en cuestión, descrito en el párrafo anterior, se realizó a partir del análisis de documentos emitidos por organismos multinacionales (Agencia Internacional de Energía (IEA por sus siglas en inglés), IRENA, Unión Europea (U.E), reportes de sustentabilidad de compañías multinacionales y bibliografía específica de autores que tratan la transición energética como Mander, Heiberg y Vaclav Smil entre otros, así como también aportes bibliográficos referidos a las temáticas de desarrollo. La actualidad del tema de estudio implicó que una parte fundamental del análisis documental y bibliográfico haya estado constituida por la recopilación de artículos periodísticos, iniciada con anterioridad a la escritura formal de la tesis. Los conceptos centrales que se ha intentado analizar y vincular son los de: Transición, Energía y Desarrollo. Mediante los métodos antes definidos, se intentó sintetizar el modo en que la transición energética puede resultar un límite a la noción de desarrollo, a partir del establecimiento de la noción de límite y el vínculo no siempre explicitado por las entidades que dan forma a la transición actual entre energía y desarrollo sustentable.

Se decidió indagar en la cuestión de la transición energética como un límite al desarrollo a partir de la observación de una presión cada vez mayor sobre las fuentes de energía renovables que no parece tener en cuenta factores vinculados a sus tasas de retorno energético (Mander y Heiberg, 2009) , los tiempos de implantación de una nueva fuente primaria, ni el hecho que estamos hablando en la mayoría de los casos (Solar, Eólica, Hidrógeno-vector energético-Geotérmica y Biomasa) de tecnologías que ya tienen un grado importante de madurez.

En el centro de la transición energética actual nos encontramos con una propuesta disruptiva para el sistema energético global: el abandono de las fuentes de energía de origen fósil idealmente para el año 2050, con un consecuente reemplazo de estas por energías renovables. Sin embargo, estas últimas en solitario o combinadas en una matriz energética no logran hasta el momento y con el grado de avance de la tecnología, cantidades de energía equivalentes a

La transición energética como un límite al desarrollo en un contexto de globalización e interdependencia

las generadas por fuentes de origen fósil. De no mediar un cambio tecnológico disruptivo en las energías renovables o modificar el paradigma de consumo energético imperante, nos encontramos frente a un conjunto de circunstancias tales no pueden menos que alterar el desarrollo evidenciado por la humanidad desde la última revolución industrial, sustentada fundamentalmente en la transición energética hacia fuentes fósiles. Es por tanto que se considera necesario un aporte al extenso campo del estudio de la energía que haga foco sobre la necesidad de introducir al desarrollo como una variable más para tener en cuenta a la hora de tratar la pujante transición energética. Introducir al desarrollo no es ni más ni menos que introducir al ser humano en el centro de la transición energética.

Qué la transición energética pueda suponer un límite al desarrollo, no pretende desalentar la misma en tanto y en cuanto contar con medios de energía sustentables en el tiempo debiera resultar un hecho eminentemente bueno para la sociedad. Lo que se pretende poner de manifiesto en este trabajo es la necesidad de considerar el conjunto de cuestiones que una transición energética supone como el abandono paulatino o caótico de las fuentes preexistentes (Paraskova,2020), los efectos sobre los precios, el intercambio global de bienes e información y el movimiento de las personas. Para tomar una idea de la dimensión que la transición supone vale la pena citar informe de la International Energy Agency (I.E.A.) en lo que respecta al logro de emisiones cero para el año 2050: "Esto requiere nada menos que una transformación completa de las formas en que producimos, transformamos y consumimos energía" (I.E.A., 2021, p 13). Obviar la relación entre desarrollo y energía, asumiendo que el primero se concretará sin perjuicio de la fuerza que lo dinamice es un simplismo que puede tener consecuencias peores al daño que se pretende evitar.

Palabras Clave:

Transición, Energía, Desarrollo,

Índice de Contenidos

Planteo del trabajo de tesis	5
Justificación/Fundamentación/Aportes	5
Objetivo de la tesis	9
Hipótesis	9
Comentario sobre la bibliografía seleccionada	9
Introducción	12
Capítulo 1– Definición de conceptos centrales. Desarrollo, energía, transición energética y parámetros técnicos	14
Tiempo	18
Convertidores primarios	20
Densidad de Potencia	22
EROEI	29
Apartado: Energía Nuclear	36
Una mirada más cercana al hidrogeno	42
Consideraciones finales del capítulo 1	46
Capítulo 2 Transición Energética – Análisis de la problemática a partir de publicaciones específicas	50
Primer documento: World Energy Transitions Outlook de IRENA - 2022	53
Segundo documento: Net Zero by 2050. A Roadmap for the Global Energy Sector de IEA - 2021	69
Tercer Documento: Chevron Climate change resilience: advancing a lower carbon future. Chevron - 2021	77
El aporte del pacto verde europeo para comprender la dimensión de la transición energética	85
Consideraciones finales del capítulo 2	87
Conclusión	89
Nota Referida a la COP28	92
Bibliografía	94

Planteo del trabajo de tesis

Este trabajo de tesis, correspondiente a la Maestría interdisciplinaria en Energía dictada por el CEARE (Centro de Estudios de la Actividad Regulatoria Energética), puede ser definido como un trabajo de investigación teórica conforme a la definición que se extrae de la guía metodológica para la presentación del plan de tesis de doctorado de la Facultad de Ciencias Económicas perteneciente a la Universidad de Buenos Aires. Es decir, que se ha intentado realizar una exploración profunda que involucra la revisión y el análisis exhaustivo de teorías existentes, desarrollos teóricos y conceptuales relevantes dentro del campo de la transición energética actual y el vínculo de esta con la noción de desarrollo sostenible.

Considerando el clásico de Umberto Eco “Cómo se hace una tesis” (1977) este trabajo podría ser también catalogado como una tesis panorámica dado que se caracteriza por tener un alcance amplio en lo que hace a su campo de aplicación, y estar la metodología de trabajo fundada en la revisión de literatura pertinente, incluyendo dentro de la misma a las publicaciones que realizan las agencias internacionales que conceptualizan, dan forma y en gran medida marcan el ritmo de la transición energética. De acuerdo con el semiólogo italiano la tesis panorámica implica realizar un análisis y síntesis de la información obtenida, en lugar de centrarse en el estudio de un objeto específico.

Es mediante la revisión crítica y reflexiva de las teorías existentes que se intenta probar la hipótesis de trabajo y a su vez dejar planteadas potenciales líneas de investigación adicionales para trabajos ulteriores. En última instancia, el presente trabajo es una invitación al lector a repensar la cuestión de la energía disponible como límite último de toda posibilidad para el accionar humano. La energía disponible como límite del accionar humano por antonomasia.

Justificación/Fundamentación/Aportes:

Se decide trabajar, en el marco de un trabajo de investigación teórica la relación entre la transición energía actual y el desarrollo. La transformación del sistema energético mundial, caracterizada por la transición desde fuentes primarias fósiles hacia fuentes de energía descarbonizadas y sustentables en el tiempo, se presenta, en las primeras tres décadas del siglo XXI, como la cuestión más relevante de la agenda global. No se trata de la primera transición energética en la historia del hombre, sin embargo, y aunque cada transición está signada por características propias, a veces globales y, en otras oportunidades, más de tipo regional, se han registrado patrones comunes a las mismas que no parecerían verificarse en la transición actual.

Puede afirmarse que nos encontramos frente a una transición energética distinta, que parte de una motivación medioambiental, basada en la necesidad de reducir las emisiones de carbono, y así evitar las consecuencias negativas del calentamiento global y sus consecuencias, como la pérdida de biodiversidad, la degradación del suelo, las sequías y las inundaciones que se esperan si no se reduce el aumento de la temperatura media global muy por debajo de 2 Celsius (C) con respecto a los niveles preindustriales, y se realizan esfuerzos para limitar el aumento de

la temperatura a 1.5°C para el año 2050. La transición energética surge como una respuesta global a la mencionada problemática ambiental, donde los actores involucrados toman como punto de partida que la utilización de combustibles fósiles para la generación de energía es la actividad humana que más contribuye a las emisiones de gases de efecto invernadero. Estos gases intensifican el efecto invernadero natural y aumentan la temperatura del planeta, lo que tiene efectos perjudiciales (Agencia Internacional de Energía, 2021). Aunque hay consenso mayoritario, esta explicación no es unánime en la comunidad científica internacional.

Con la cuestión medioambiental en el centro de la transición, surge un sentido de urgencia e inmediatez que contrasta, en gran medida, con los procesos de transición energética anteriores, caracterizados por ser prolongados en el tiempo. Hay una coincidencia entre las instituciones promotoras de la presente transición que se expresa en la necesidad de reducir las emisiones de CO₂ a cero para el año 2050, como condición *sine qua non* para dar cumplimiento al objetivo de mantener el aumento de la temperatura terrestre por debajo de los 1.5°C. Este cúmulo de razonamientos con sus consecuentes explicaciones tiene su máxima expresión de sentido en el Acuerdo de París de 2015.

La transición energética actual se caracteriza por ser una transición que se explica por los motivos que la dinamizan. Este punto constituye una diferencia mayúscula con las transiciones energéticas anteriores que se entendían por sus causas. El motivo se refiere a la intención, propósito o la razón subjetiva que lleva a un actor a obrar de cierta manera o a tomar una decisión. En el caso bajo análisis, hay un sistema de razonamiento que impulsa a diversos grupos interés a actuar de modo tal que se suscite un reordenamiento de la matriz energética global.

Las transiciones energéticas anteriores se entienden a partir de sus causas. Cuando nos referimos a la causa de los hechos, estamos hablando del factor que produce un efecto o resultado específico. La causa es aquello que origina un cambio o una consecuencia. El conjunto de las transiciones energéticas acontecidas a lo largo de la historia se puede entender fundamentalmente como una consecuencia de la propia evolución del hombre en sus diferentes facetas (tecnología, mecanismos de comercio e intercambio, organización del trabajo y también gustos y preferencias). Nos encontramos entonces frente a un conjunto de procesos históricos que podrían ser caracterizados como multicausales. Lo mencionado, no invalida el hecho de que los acontecimientos que fueron las causas de las transiciones anteriores hayan respondido a motivos diversos. No hay acción humana que no responda a una motivación.

En este punto no se trata de contraponer causa y motivo sino de caracterizar a las transiciones energéticas. De este modo, las transiciones acontecidas a lo largo de la historia del hombre se explican por el cómo y el qué mientras que a la actual la define el por qué. Para comprender el proceso de transición energética actual debemos partir del hecho que nos encontramos frente a un proceso transitivo que gira alrededor de una de una motivación medioambiental. Con esto queremos decir que el medio ambiente y su conservación (buscando evitar lo que se denomina calentamiento global) adquieren un grado de valor moral que justifican actuar de determinada manera. Evitar el calentamiento de la superficie de la tierra se torna por ende algo bueno en sí mismo al adquirir la categoría mencionada. Desde una perspectiva de mayor amplitud, al

La transición energética como un límite al desarrollo en un contexto de globalización e interdependencia

analizar el motivo de la transición actual nos encontramos con que no solo se trata del medio ambiente y su temperatura, sino también de las acciones del hombre en relación con ese medio ambiente. La noción de calentamiento global con la que se opera en la transición actual es una noción que asigna un rol central al comportamiento del hombre y fundamentalmente al modo en que este se da su provisión de energía.

Es posible rastrear ciertas ideas asociadas a la acción del hombre y los efectos de esta sobre el comportamiento de la naturaleza en tiempos remotos, Teofrasto (ca. 371 a. C. – ca. 287 a. C.) discípulo de Aristóteles se acercó a una idea de nicho ecológico, planteó que el desagüe de los pantanos de una ciudad había influido sobre su temperatura y también relaciono la deforestación con el calentamiento de los suelos. Los hombres de ciencias del renacimiento hicieron observaciones similares en las áreas circundantes al mediterráneo y también sostuvieron que la actividad humana pudiese afectar la realidad de los ecosistemas. Entre los siglos XVIII y XIX se dio cuenta también de los efectos en las lluvias y las inundaciones que acarrearán los cambios en el uso del suelo en el este de América del Norte donde se estaba migrando desde bosques nativos a tierras para cultivo. A finales del siglo XIX la geología realizó un aporte fundamental a las ciencias del clima haciendo foco sobre glaciaciones o periodos glaciales, demostrando que el clima de los periodos prehistóricos había sido distinto al clima actual. En este periodo también se determinó, no sin controversias y discusiones académicas que la atmosfera de la tierra colaboraba a mantener la temperatura del planeta tierra más caliente.

Las actividades humanas, principalmente vinculadas al uso del suelo como vectores del cambio en el clima también fueron incorporadas. Fourier expresó en 1827: "La fundación y progreso de las sociedades humanas, (...), pueden cambiar notablemente y en regiones vastas el estado de la superficie, la distribución del agua y los grandes movimientos del aire. Tales efectos son capaces de hacer variar, en el curso de muchos siglos, el grado promedio del calor; debido a que las expresiones analíticas contienen coeficientes que se relacionan con el estado de la superficie y el cual influye en gran medida en la temperatura."

Para finales de siglo XIX los trabajos de los suecos Arrhenius y Högbom ya incluían al CO₂ como un gas presente en la capa de ozono con implicaciones en la temperatura terrestre. En las primeras décadas del siglo XX, una corriente científica mayoritaria trabajaba sobre la base de las relaciones entre los ciclos solares y orbitales como generadores del cambio climático. Hacia los años 50 del Siglo XX, la presencia de mayores cantidades de CO₂ en la atmosfera terrestre fue aceptada como un hecho por la mayoría de la comunidad científica vinculada al estudio del cambio climático y con las mejoras en los procesos de cálculo introducidas por las calculadoras se mejoraron los cálculos de Arrhenius. Así mismo, para los años 70 el smog se había transformado en un problema urbano palpable y con ello surge, fundamentalmente en las regiones desarrolladas occidentales, lo que se podría denominar conciencia ecológica. Este último concepto se puede definir como la capacidad de comprender y apreciar la interdependencia entre los seres humanos y la naturaleza.

Generalizada, entonces, la relación entre acción humana y modificación medioambiental se comienza a observar también que la mencionada conciencia ecológica implica una actitud ética

La transición energética como un límite al desarrollo en un contexto de globalización e interdependencia

que se vincula a la conservación de ecosistemas prístinos y la menor intervención humana posible. El informe al Club de Roma de 1972 de Meadows, Meadows, Randers y Behrens, que se publica como la bajo el título de *Limits to Growth*, contribuye fuertemente con estas nociones reforzando fuertemente la idea de límites. Los autores entienden que la acción humana, caracterizada por la producción y el consumo de bienes materiales, ha rebasado los límites medioambientales. Se cita la idea de huella ambiental y la sustentabilidad se torna definitivamente en el eje de la discusión.

Es sin embargo durante los años 80' del siglo XX que la acción humana para capturar energía y la cuestión climática comienzan a vincularse. En 1980 una reunión de expertos en Villach (Austria) de la Organización Meteorológica Mundial (WMO por sus siglas en inglés), el Programa de la Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP por sus siglas en inglés) y el Consejo Internacional de Uniones Científicas (ICSU por sus siglas en inglés) donde se discute la evaluación del papel del dióxido de carbono en las variaciones climáticas y su impacto en el clima subrayaba cinco áreas de especial atención, que casualmente podemos encontrar vigentes más de 40 años años después:

- Consumo probable de combustible fósil del próximo siglo
- Modos prospectivos de gestión de la biosfera global a lo largo del próximo siglo
- Distinción del ciclo del carbono y cuantificación del reparto del dióxido de carbono entre la atmósfera, los océanos y la biosfera
- Respuesta climática al aumento del dióxido de carbono en la atmósfera
- Impacto potencial del cambio climático

Estas áreas de interés fueron recogidas por lo que luego sería el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés) que opera bajo el ámbito del Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo PNUD y la Organización Meteorológica Mundial, y hoy es una de las voces más resonantes en las cuestiones referidas al mentado calentamiento global desde una óptica pana estatal.

Que la transición energética sea motivada por una cuestión medioambiental, más específicamente que la misma surja como una manera de evitar calentamiento global, que conforme a una opinión científica mayoritaria está directamente vinculado con la liberación de CO₂ como resultado de la utilización de combustibles fósiles para la generación de energía, implica que el conjunto de los lineamientos que guiarán a la transición energética tendrá un sentido determinado y se preferirán ciertos cursos de acción por sobre otros.

La transición podría haber estado motivada por cuestiones vinculadas a la sustentabilidad, tales como la inviabilidad de un sistema energético global basado en fuentes no renovables (principio del peak oil rebatido una y otra vez por la industria del petróleo y el gas) o bien por aspectos ambientales vinculados a la degradación de los ecosistemas y los límites que la biosfera impone a un sistema económico global basado en el consumo (línea conservacionista del club de Roma o ecologismo tradicional) sin embargo no lo está y en la medida que se comprenda la motivación

La transición energética como un límite al desarrollo en un contexto de globalización e interdependencia

de esta transición energética se podrá comprender de manera más efectiva el curso que toma la misma y a su vez las críticas que suscita.

Objetivo de la tesis:

El objetivo general de la tesis es demostrar que la transición energética actual implica una nueva configuración del sistema global de energía que dispondría de menores flujos energéticos. En virtud de lo expresado se intenta encender una luz de alarma con respecto a los posibles impactos de la transición energética sobre el desarrollo sostenible. El trabajo busca determinar que la transición energética actual en los términos que está siendo planteada por los principales organismos formadores de opinión a nivel mundial conduce a limitar las posibilidades de proseguir una senda de desarrollo. En resumen, tal como se plantea en el título, el objetivo consiste en determinar a partir del análisis teórico y la lectura de la realidad circundante si la transición energética supone un límite al desarrollo en un contexto de globalización e interdependencia.

Hipótesis:

La hipótesis de esta tesis de la Maestría en Energía, bajo el título "La transición energética como un límite al desarrollo en un contexto de globalización e interdependencia" dentro del programa interdisciplinario del CEARE, dependiente del Rectorado de la Universidad de Buenos Aires, plantea que la modificación de los sistemas energéticos a nivel global como resultado de la transición energética actual puede influir significativamente en la capacidad del ser humano para satisfacer sus necesidades tanto presentes como futuras. Una comprensión cabal de la transición energética actual y sus impactos implica necesariamente explicitar el vínculo existente entre energía y desarrollo y reafirmar la condición de la energía disponible como límite absoluto.

Comentario sobre la bibliografía seleccionada

Siendo esta tesis un trabajo de investigación teórica, consideramos que resulta pertinente hacer un comentario sobre los principales autores que han sido seleccionados. La primera parte de este trabajo, en donde se vierten los conceptos teóricos que sustentan el análisis de situación de la transición energética que se realiza en la segunda parte de este están fundamentalmente basados en la obra de Vaclav Smil, Joseph Tainter y Charles Hall.

Vaclav Smil, Joseph Tainter y Charles Hall son figuras prominentes en el campo de los estudios energéticos y comparten puntos de vista fundamentales sobre la energía como un aspecto crucial en la organización de los sistemas. Aunque cada uno tiene sus propias áreas de enfoque, hay puntos comunes en sus concepciones:

La transición energética como un límite al desarrollo en un contexto de globalización e interdependencia

Importancia de la energía en la sociedad: Los tres coinciden en que la energía es fundamental para el funcionamiento de las sociedades humanas y para la viabilidad de los sistemas socioeconómicos y ecológicos. Consideran que la energía es esencial para la producción, el crecimiento económico y el mantenimiento de la civilización.

Relación entre energía y complejidad social: Comparten la idea de que el uso de la energía está intrínsecamente ligado al desarrollo y mantenimiento de la complejidad social. Joseph Tainter, por ejemplo, en su teoría del colapso de las sociedades complejas, argumenta que el aumento en la complejidad social requiere mayores cantidades de energía para sostenerse, y cuando los rendimientos marginales de esa complejidad disminuyen, puede llevar al colapso.

Perspectiva interdisciplinaria: Los tres académicos adoptan un enfoque interdisciplinario para comprender la relación entre energía, sociedad y medio ambiente. Consideran que la comprensión de esta relación requiere la integración de múltiples disciplinas, como la ecología, la economía, la historia y la ciencia de los sistemas.

Reconocimiento de los límites energéticos: Comparten la preocupación por los límites de los recursos energéticos finitos y la necesidad de transitar hacia formas más sostenibles y eficientes de energía para garantizar la viabilidad a largo plazo de la sociedad humana.

Estos académicos comparten una preocupación común por los límites de los recursos energéticos finitos y la necesidad imperante de transitar hacia fuentes de energía más sostenibles y eficientes. Todos convergen en su comprensión de la importancia de entender los flujos de energía para garantizar el desarrollo continuo de la sociedad humana en un contexto de creciente interconexión global.

Al realizar un comentario sobre la bibliografía seleccionada es indispensable detenerse un momento en lo que podríamos denominar la piedra fundacional del pensamiento energético-ambiental moderno y más aún cuando se analiza a la energía en su vínculo con el desarrollo: El informe "Limits to Growth" publicado por el Club de Roma en 1972, con aportes del equipo liderado por Donella Meadows, Dennis Meadows, Jørgen Randers y William W. Behrens III. Este trabajo, se centró en el análisis de los límites del crecimiento en un contexto de recursos finitos y el impacto de las actividades humanas en el medio ambiente.

Estos autores, al igual que los académicos mencionados, comparten una preocupación fundamental por los límites de los recursos naturales y la importancia de entender las interrelaciones entre el crecimiento económico, el uso de recursos y la energía disponible.

En "Limits to Growth", se advierte sobre la insostenibilidad del crecimiento ilimitado en un planeta con recursos finitos. El informe utilizó modelos para simular diferentes escenarios de crecimiento poblacional, industrialización, producción de alimentos y agotamiento de recursos. Sus conclusiones destacaron la posibilidad de un crecimiento desenfrenado llevando a desafíos como la escasez de recursos, el deterioro ambiental y el colapso del sistema si no se implementaban cambios significativos.

Los planteamientos de Smil, Tainter y Hall convergen con las ideas presentadas en "Limits to Growth". Estos académicos enfatizan la importancia de entender los límites de los recursos energéticos y su relación con el desarrollo humano. Comparten la preocupación por la necesidad de transitar hacia fuentes de energía más sostenibles y eficientes, reconociendo los límites de un crecimiento económico y poblacional sin considerar las restricciones ambientales y energéticas. En conjunto, las obras de Smil, Tainter, Hall y el informe del Club de Roma subrayan la importancia de considerar los límites naturales en el desarrollo humano, señalando la necesidad de políticas y prácticas más sostenibles para garantizar un futuro viable para la sociedad y el medio ambiente.

Es menester diferenciar el concepto de desarrollo humano, tal como fue esbozado por el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) en 1987, el cual se centra en una perspectiva multidimensional del progreso humano. Se enfoca en mejorar la calidad de vida de las personas y la sociedad en su conjunto, más allá del mero crecimiento económico. El informe del PNUD introdujo el Índice de Desarrollo Humano (IDH) como una medida compuesta que considera indicadores clave como la esperanza de vida, el acceso a la educación y el nivel de vida, con el objetivo de evaluar el bienestar humano en diferentes países.

Por otro lado, el concepto de crecimiento planteado en "Limits to Growth" del Club de Roma no se refiere exclusivamente al crecimiento económico, sino al crecimiento global en términos de población, producción industrial, consumo de recursos naturales y emisión de contaminantes. Este informe destacó cómo un crecimiento ilimitado en un mundo con recursos finitos podría llevar a problemas de escasez de recursos, degradación ambiental y eventualmente al colapso de los sistemas si no se implementaban cambios significativos en la forma en que se gestionan los recursos y se planifica el crecimiento.

La diferencia principal radica en que el enfoque de desarrollo humano propuesto por el PNUD busca mejorar la calidad de vida de las personas, promoviendo aspectos como la educación, la salud y la igualdad, mientras que el concepto de crecimiento planteado en "Limits to Growth" se centra en el crecimiento global en términos de recursos consumidos y la capacidad del planeta para sostener ese crecimiento a largo plazo. El desarrollo humano se refiere a un enfoque más holístico que busca mejorar la calidad de vida de las personas, mientras que la noción de crecimiento en "Limits to Growth" aborda el crecimiento global en términos de uso de recursos y su sostenibilidad en un contexto de límites ecológicos, dentro de lo que podría considerarse como una lógica Malthusiana.

En el presente trabajo si bien se utilizan nociones de "Limits to Growth" la relación que se encuentra en estudio es entre energía y desarrollo, entendiendo que el crecimiento no es una condición necesaria para lograr el mismo.

Introducción

La transformación del sistema energético mundial, caracterizada por la transición desde fuentes primarias fósiles hacia fuentes de energía descarbonizadas y sustentables en el tiempo, se presenta, en las primeras tres décadas del siglo XXI, como la cuestión más relevante de la agenda global. No se trata de la primera transición energética en la historia del hombre, sin embargo, y aunque cada transición está signada por características propias, a veces globales y, en otras oportunidades, más de tipo regional, se han registrado patrones comunes a las mismas que no parecerían verificarse en la transición actual.

Puede afirmarse que nos encontramos frente a una transición energética distinta, que parte de una motivación medioambiental, basada en lo que se expresa como una necesidad de reducir las emisiones de carbono, y así evitar las consecuencias negativas del calentamiento global y sus consecuencias, como la pérdida de biodiversidad, la degradación del suelo, las sequías y las inundaciones que se esperan si no se reduce el aumento de la temperatura media global muy por debajo de 2^o Celsius (C) con respecto a los niveles preindustriales, y se realizan esfuerzos para limitar el aumento de la temperatura a 1.5^o C para el año 2050. La transición energética surge como una respuesta global a la mencionada problemática ambiental, reconociendo que la quema de combustibles fósiles es la actividad humana que más contribuye a las emisiones de gases de efecto invernadero. Estos gases intensifican el efecto invernadero natural y aumentan la temperatura del planeta, lo que tiene efectos perjudiciales. Aunque hay consenso mayoritario, esta explicación no es unánime en la comunidad científica internacional.

Con la motivación medioambiental en el centro de la transición, surge un sentido de urgencia e inmediatez que contrasta, en gran medida, con los procesos de transición energética anteriores, caracterizados por ser prolongados en el tiempo. Hay una coincidencia entre las instituciones promotoras de la presente transición que se expresa en la necesidad de reducir las emisiones de CO₂ a para el año 2050 y lograr así emisiones netas cero “*net zero*”, como condición *sine qua non* para dar cumplimiento al objetivo de mantener el aumento de la temperatura terrestre por debajo de los 1.5°C. Este cúmulo de razonamientos con sus consecuentes explicaciones tiene su máxima expresión de sentido en el Acuerdo de París de 2015.

En el contexto mencionado intentaremos observar las características principales de la transición energética, a la luz de ciertos parámetros, y comparando su comportamiento con transiciones energéticas anteriores: tiempo, conversores primarios, densidad de potencia y tasas de retorno energético son los criterios elegidos. A su vez, en la segunda parte de este trabajo, se realizará un análisis de la problemática a partir de las publicaciones específicas, de los agentes dominantes en juego, que guían la transición. Intentaremos cubrir un espectro amplio de intereses vinculados a este cambio. Todo el análisis del proceso en cuestión se hará bajo la premisa de un vínculo inquebrantable entre energía y desarrollo. Se intentará sintetizar el modo en que la transición energética puede resultar un límite a la noción de desarrollo. Trabajaremos, fundamentalmente, a partir de la noción de desarrollo sustentable, inscripta en el marco de la noción de desarrollo humano. En 1990, el Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) estableció que el desarrollo humano se refiere a un proceso fundamentalmente vinculado a las oportunidades del hombre, determinado que el acceso a disfrutar de una vida

sana y prolongada, la educación y el acceso a los recursos básicos para lograr un nivel de vida decente son las que revisten el carácter de esenciales. En qué medida un cambio en los arreglos del sistema energético global puede alterar la posibilidad del hombre, de darse a sí mismo y a los demás miembros de la comunidad estas oportunidades, es uno de los interrogantes que guiarán este trabajo.

Qué la transición energética pueda suponer un límite al desarrollo, no pretende desalentar este proceso, en tanto y en cuanto contar con medios de energía sustentables en el tiempo debiera resultar un hecho eminentemente bueno para la sociedad. Lo que se pretende poner de manifiesto es la necesidad de considerar un conjunto de cuestiones que la transición energética actual implica, como el abandono paulatino o caótico de las fuentes preexistentes, los efectos sobre los precios, el intercambio global de bienes e información y el movimiento de las personas. Para tomar una idea de la dimensión que esta transición supone vale la pena citar el informe de la International Energy Agency (I.E.A.) en lo que respecta al logro de emisiones cero para el año 2050: "Esto requiere nada menos que una transformación completa de las formas en que producimos, transformamos y consumimos energía" (I.E.A., 2021: P13). Obviar la relación entre desarrollo y energía, asumiendo que el primero se concretará sin perjuicio de la fuerza que lo dinamice es un simplismo que puede tener consecuencias peores al daño que se pretende evitar.

Capítulo 1– Definición de conceptos centrales. Desarrollo, energía, transición energética y parámetros técnicos

Las primeras décadas del siglo XXI serán recordadas por la pandemia del SARS CoV-2 (COVID 19), el conflicto armado entre la Federación Rusa y Ucrania, que al momento de escribir este trabajo dejan al mundo a las puertas de una tercera guerra mundial, y por el afán de numerosos actores estatales y supranacionales por lograr una transición energética desde fuentes fósiles hacia fuentes de energía renovables o limpias (por su nula o baja emisión de carbono a la atmósfera). Los tres eventos mencionados permiten comprender la escala de globalización e interdependencia en la que se haya el mundo actual. Por un lado, estos fenómenos, para ser comprendidos, necesitan un abordaje más amplio que el de estado-nación, y así mismo su evolución, progresión en el tiempo y eventual desenlace están determinados por las relaciones de un conjunto de actores sociales que se desarrollan en un contexto de total interdependencia.

Es interesante recalcar que la complejidad del contexto actual excede por completo a la de aquellos otros contextos donde se sucedieron las transiciones energéticas precedentes. En el estudio *The Collapse of Complex Societies* (1987), Joseph Tainter determina los motivos que llevan a las organizaciones humanas a ganar y, también, a perder niveles de complejidad. Como regla general, el autor determina que la complejidad surge como una reacción del orden social para hacer frente a la resolución de problemas o al aprovechamiento de oportunidades. De esto modo, el movimiento hacia estructuras más complejas se trataría en un primer momento de una estrategia productiva racional que genera un rendimiento marginal favorable. Sin embargo, los avatares propios de la dinámica social, como son la presión continua de las partes sobre la estructura, el surgimiento de desafíos no planeados y los costos propios de mantener al cuerpo societario cohesionado o lo que sería el costo de la integración sociopolítica se suelen conjugar para generar una reducción de este rendimiento marginal en el tiempo. Cuando la tendencia a la baja no puede ser contrarrestada, por ejemplo, a partir de la adquisición de un subsidio energético (léase subsidio como una nueva fuente con mejor tasa de rendimiento energético), la sociedad se vuelve vulnerable a oleadas de estrés para las que se encuentra demasiado débil o empobrecida para enfrentar, perdiendo a su vez, el apoyo de su población.

Joseph Tainter sostiene que el colapso de una civilización (en el presente trabajo utilizamos la acepción sociedad en función de los horizontes temporales y demarcaciones geográficas que le son propias a las transiciones energéticas) sucede cuando se presenta una pérdida rápida y significativa de un nivel establecido de complejidad sociopolítica. A partir de la evidencia histórica y su sistematización, el autor detalla que son cuatro los conceptos mediante los que se puede entender el colapso:

1. Las sociedades humanas son organizaciones que resuelven problemas
2. Los sistemas sociopolíticos requieren energía para su mantenimiento
3. Una mayor complejidad conlleva mayores costos per cápita
4. La inversión en complejidad sociopolítica como respuesta a la resolución de problemas a menudo llega a un punto de rendimiento marginal decreciente

En la línea argumentativa del antropólogo perteneciente a la Universidad de Utah, se establece que los sistemas sociopolíticos requieren energía para sostenerse. Por ende, un cambio repentino, tal como el que se vislumbra para la transición energética actual, no observado en transiciones anteriores y que a su vez que propone la utilización de sistemas energéticos con retornos menores, podría conducir a situaciones de colapso para las estructuras sociopolíticas conocidas, en tanto el nivel de energía que el sostenimiento de su complejidad requiere no pueda ser asegurado.

En función de lo anterior, es posible incorporar al análisis la relación entre energía e información. El aumento de información podría ser considerado como un escenario de mayor complejidad. En las diferentes etapas de la civilización, el hombre ha conseguido hitos evolutivos como resultado de la apropiación de excedentes energéticos cada vez mayores, por ejemplo, el desarrollo de la máquina a vapor, la explotación del carbón, del petróleo y el gas, han permitido el pasaje de una sociedad preindustrial a una sociedad industrial y así sucesivamente. Es posible observar como en la sociedad postindustrial hay una alta cantidad de información, pero una tendencia a la baja energía, lo que abre un interrogante sobre la posibilidad de sostener el desarrollo en un medio de menor energía disponible. Como se dijo, para Tainter la pérdida repentina de un nivel de complejidad puede suponer el colapso de una civilización, por lo tanto, estas transiciones deberían ocurrir de modo paulatino y/o planificado.

Con la relación entre complejidad del sistema social y energía en mente, parece oportuno comenzar a delinear el concepto de desarrollo. Hay tantas definiciones de desarrollo sostenible como autores, pensadores y organizaciones abocadas al tema, sin embargo, a la hora de tomar una definición que permita trabajar el objeto de estudio, se toma la elaborada en el informe "Nuestro Futuro Común" (1987), por la Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo de la ONU, también conocido como el informe *Brundtland* (por su presidente) y que luego fue adoptada por el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD). Conviene detenerse, a los fines de este trabajo de tesis, en una aclaración del propio Brundtland contenida en el prefacio del informe: "(...) el "medio ambiente" es donde vivimos todos, y el "desarrollo" es lo que todos hacemos al tratar de mejorar nuestra suerte en el entorno en que vivimos. Ambas cosas son inseparables." (Nuestro Futuro Común, ONU, 1987: P12). Con esta consideración presente, el informe define:

Está en manos de la humanidad hacer que el desarrollo sea sostenible, duradero, o sea, asegurar que satisfaga las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones para satisfacer las propias. El concepto de desarrollo duradero implica límites -no límites absolutos, sino limitaciones que imponen a los recursos del medio ambiente el estado actual de la tecnología y de la organización social, y la capacidad de la biósfera de absorber los efectos de las actividades humanas. Pero tanto la tecnología como la organización social pueden ser ordenadas y mejoradas de manera que abran el camino a una nueva era de crecimiento económico. La Comisión cree que ya no es inevitable la pobreza general. La pobreza es no sólo un mal en sí misma. El desarrollo duradero exige que se satisfagan las necesidades básicas de todos y que se extienda a todos la oportunidad de colmar sus aspiraciones a una vida mejor. (Nuestro Futuro Común, ONU, 1987:12).

Al tomar la noción de desarrollo sostenible como acepción amplia del desarrollo, entendemos que ésta contiene la amplitud conceptual necesaria para ser relacionada con un proceso (la transición energética) que trasciende parámetros técnicos aislados (económicos y físicos) y se inscribe en el espectro amplio de las ciencias sociales. Es decir, se privilegia la idea de desarrollo sostenible, entre otras nociones de este concepto, por su aceptación multidisciplinaria e ideológica. El desarrollo sostenible es algo bueno en sí mismo y figura como meta o resultado deseado para la mayor parte de las plataformas ideológicas de este tiempo. Su espectro amplio y la incorporación de la responsabilidad intergeneracional se encuentran en la base de su aceptación universal, diferenciándose de concepciones más tradicionales, como las neoclásicas, las marxistas y las estructuralistas. El desarrollo sostenible como concepto o definición le imprime a la cuestión del desarrollo una orientación hacia individuo y sus necesidades particulares, sin olvidar el compromiso con las generaciones futuras. De todos modos, es fundamental tener en cuenta que la capacidad de accionar para satisfacer las necesidades humanas es inherente a la cantidad de energía disponible, lo que nos lleva a plantearnos el vínculo entre estos dos fenómenos.

Desarrollo y energía cuentan con una correlación directa cualquiera sea la concepción del desarrollo desde la que se parta. Por definición, de la Real Academia Española, “energía es la capacidad que tiene un sistema para realizar un trabajo”, por lo tanto, si consideramos que el desarrollo siempre implica la realización de una actividad o de un conjunto de actividades, que dan lugar a un estado de situación mejor que el anterior, éstas no pueden realizarse, en forma sostenida, si el suministro de energía no está asegurado. Como se mencionó, cuando se habla de desarrollo sustentable, la energía necesaria debe satisfacer tanto las necesidades de las generaciones presentes como futuras. El propio Programa de las Naciones Unidas para Desarrollo, incorpora, en el 2015, la cuestión energética como uno de los objetivos del desarrollo sostenible (ODS). Según el organismo de Naciones Unidas, los ODS suponen “un llamamiento universal para poner fin a la pobreza, proteger el planeta y garantizar que para el 2030 todas las personas disfruten de paz y prosperidad”, dentro de estos, el objetivo número siete se

La transición energética como un límite al desarrollo en un contexto de globalización e interdependencia

denomina “energía asequible y no contaminante”. Las metas que se enumeran para el ODS número 7 son las siguientes:

7.1 De aquí [2015] a 2030, garantizar el acceso universal a servicios energéticos asequibles, fiables y modernos

7.2 De aquí [2015] a 2030, aumentar considerablemente la proporción de energía renovable en el conjunto de fuentes energéticas

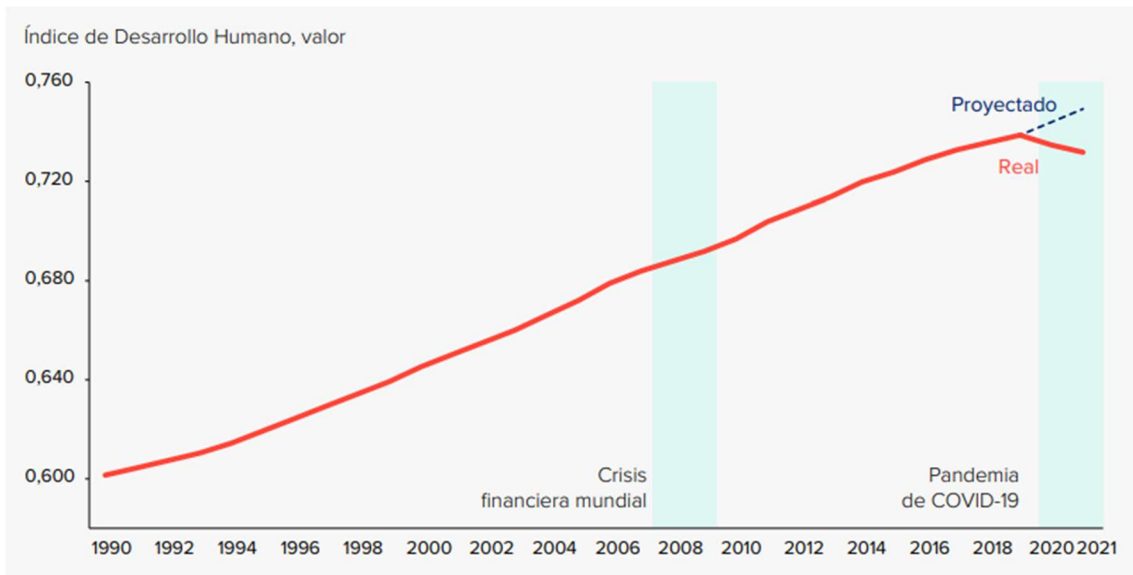
7.3 De aquí [2015] a 2030, duplicar la tasa mundial de mejora de la eficiencia energética

7.a De aquí [2015] a 2030, aumentar la cooperación internacional para facilitar el acceso a la investigación y la tecnología relativas a la energía limpia, incluidas las fuentes renovables, la eficiencia energética y las tecnologías avanzadas y menos contaminantes de combustibles fósiles, y promover la inversión en infraestructura energética y tecnologías limpias

7.b De aquí [2015] a 2030, ampliar la infraestructura y mejorar la tecnología para prestar servicios energéticos modernos y sostenibles para todos en los países en desarrollo, en particular los países menos adelantados, los pequeños Estados insulares en desarrollo y los países en desarrollo sin litoral, en consonancia con sus respectivos programas de apoyo. (ODS, 2015)

En el marco de la transición energética actual, se abre un interrogante con respecto a la capacidad de los nuevos aprovechamientos (dominados por la generación renovable) de sostener un flujo de energía que permita asegurar la vía del desarrollo sostenible. Las energías de fuentes fósiles que todavía dominan la matriz energética global, como se ve en el gráfico a continuación, han sido parte del incremento sostenido del Índice de Desarrollo Humano, durante casi veinte años, aunque, el costo medioambiental ha sido elevado. El suministro continuo y precio competitivo de la energía fósil se ven contrastados por los serios daños que su utilización ha generado en el medio ambiente.

La transición energética como un límite al desarrollo en un contexto de globalización e interdependencia



Informe sobre Desarrollo Humano 2021/2022 (2022, PNUD)

Por su parte, las energías renovables aseguran un grado de baja o nula contaminación medioambiental, pero, el estado de la tecnología actual aún no ha podido resolver la cuestión de la intermitencia y con ello dotar de seguridad al flujo. La carencia de infraestructura también tiene un impacto negativo en el costo de los sistemas energéticos renovables. Se podría considerar, entonces, que, en términos energéticos, el desarrollo sostenible requiere de la búsqueda de una combinación óptima de fuentes energéticas. Es importante comprender los elementos que hacen a una transición energética y los parámetros que posibilitan la comparación entre fuentes de energía diversas para poder evaluar si el modo en que está planteada la transición actual conduce a un estado de situación de mayor viabilidad para el desarrollo sostenible o bien supone una limitación para éste.

De acuerdo con Vaclav Smil (2010), el término transición energética se utiliza con mayor frecuencia para describir el cambio en la estructura del suministro de energía primaria, el paso gradual de un patrón específico de suministro de energía a un nuevo estado de un sistema (matriz energética). El estudio de transiciones energéticas anteriores da cuenta de que éstas se explican como el resultado convergente de ciertas variables, algunas de ellas trabajadas por Smil, y ciertos procesos socioculturales: tiempo, conversores primarios, densidad de potencia y tasas de retorno de energía (EROEI).

Tiempo

Para Smil (2010) las transiciones energéticas son procesos largos, con implicancias profundas en el entramado social puesto que implican un cambio en la fuente a partir de la cual una sociedad se provee de la energía necesaria para subsistir. Smil insiste en que los procesos de transición energética suelen medirse en varias décadas

La transición energética como un límite al desarrollo en un contexto de globalización e interdependencia

Las transiciones energéticas han sido, y seguirán siendo, asuntos intrínsecamente prolongados, particularmente en países grandes cuyos altos niveles de uso de energía per cápita y cuyas infraestructuras masivas y costosas hacen que sea imposible acelerar su proceso transitivo incluso si tuviéramos que recurrir a algunas intervenciones altamente efectivas (2010: P153, traducción propia.)¹

Si se toman los prospectos para la transición energética, publicados por las diversas agencias de energía y desarrollo, así como la perspectiva de los movimientos ambientalistas y/o conservacionistas y las de cierto espectro del mundo académico, dedicado al estudio del ambiente, se parte de una noción de urgencia para explicar la transición energética actual. Hay una coincidencia entre las entidades promotoras de la presente transición que se expresa en la necesidad de reducir las emisiones de CO₂ a cero para el año 2050, como condición *sine qua non* para dar cumplimiento al objetivo superior de mantener el aumento de la temperatura terrestre por debajo de los 1.5°C. La *Net Zero Coalition* perteneciente a las Naciones Unidas expresa el punto con claridad:

La ciencia ha demostrado claramente que a fin de evitar los peores impactos del cambio climático y para conservar un planeta habitable, el aumento global de la temperatura necesita limitarse a no más de 1,5 °C por encima de los niveles preindustriales. En la actualidad, la Tierra ya tiene un calentamiento superior al 1,1 °C en comparación a finales del siglo XIX, y las emisiones continúan elevándose. Para mantener el calentamiento global por debajo de 1,5 °C, tal como se exigió en el Acuerdo de París, es necesario que las emisiones se reduzcan alrededor del 45 % para 2030 y que se alcance el cero neto hacia 2050. (Naciones Unidas, 2022)

De lo anterior se entiende, por un lado, la urgencia en la concreción de la transición y por otro una relación directamente proporcional entre lo que se denominan las emisiones y el aumento de temperatura en la tierra. Si bien se comprende la necesidad de la reducción de las emisiones, a fin de evitar el ingreso en una fase ambiental irreversible y nociva, es también necesario recalcar que, como se mencionó, una de las características principales de las transiciones energéticas es su prolongación en el tiempo. No es posible obviar que se está intentando reemplazar el origen de los flujos energéticos que le valieron al hombre su capacidad de modificar el entorno en su propio beneficio durante los últimos casi 200 años (Smil, 2010). Soslayar la profundidad y alcance de esta modificación puede conducir a errores de planificación

¹ Energy transitions have been, and will continue to be, inherently prolonged affairs, particularly so in large nations whose high levels of per capita energy use and whose massive and expensive infrastructures make it impossible to greatly accelerate their progress even if we were to resort some highly effective interventions.

que priven a la humanidad de recursos energéticos en el mediano plazo y por lo tanto supongan un límite a las condiciones de desarrollo. La nueva concepción de transición energética que se propone, y su presión en el horizonte temporal es cuanto menos peligrosa y no ha sido atestiguada en las transiciones energéticas, de distinta escala, que el hombre ha llevado a cabo con éxito con anterioridad. Un reemplazo apresurado de las fuentes de energías fósiles por otras de menor retorno genera la imposibilidad de asegurar los flujos de energía necesarios para sostener el nivel de complejidad sobre el que se asienta la sociedad actual, lo que podría desembocar, en términos de Tainter, en una situación de colapso general.

En el 2020, conforme al *Statistical Review of World Energy 2021*, publicado por BP (ex-British Petroleum), el consumo de energía primaria para fuentes renovables alcanza, a nivel global, una participación del 5.7%. El desplazamiento de este porcentaje hasta participaciones significativas confirma que dejar atrás las fuentes fósiles y dar lugar a nuevas renovables, no será un evento disruptivo del mismo modo que no lo han sido ninguna de las transiciones energéticas anteriores. No es posible evitar pensar en horizontes de varias décadas.

Convertidores primarios

En líneas generales, con alguna excepción de aprovechamientos rudimentarios de biomasa o la luz solar, el recurso energético requiere de un convertidor primario o sistema de captura que logre transformar la energía del recurso (solar, química, cinética, eólica, calórica, por solo mencionar algunas) en energía útil para el ser humano. Por ejemplo, el motor de vapor, popularmente conocido como máquina a vapor, al igual que los motores de combustión interna, determinaron el éxito de la revolución industrial al permitir la captura de la energía química contenida en los hidrocarburos de forma más efectiva que convertidores anteriores.

El recurso energético por sí mismo carece de valor o de utilidad y solo lo adquiere en la medida en que se transforma en energía útil. Un recurso energético, como la luz solar, el agua, el viento o los hidrocarburos, aún no transformado en energía utilizable es comúnmente denominado energía primaria. Los convertidores primarios son los sistemas que permiten transformar la energía primaria en fuentes de energía utilizables para la satisfacción de necesidades humanas, es decir son los nexos entre el recurso energético y las fuentes de energía. En la actualidad, los convertidores primarios más comunes son los motores alimentados por diversos combustibles, así como las turbinas y las células fotovoltaicas. El conjunto compuesto por un recurso energético, sus procesos de transformación químicos y físicos, el motor primario y la infraestructura de transporte y distribución requerida para que este sistema sea capaz de satisfacer una necesidad energética constituyen una fuente de energía, por ejemplo, si tomamos la energía eólica, hablamos del viento, el parque eólico (aerogeneradores), las conexiones a la red de transporte de alta tensión, y sus convertidores para la distribución en media y baja tensión.

Comprender una transición energética implica tanto un entendimiento de las fuentes de energía, como de los convertidores primarios y de los recursos energéticos disponibles. Como ya ha sido mencionado, la transición energética refiere a un nuevo estado del suministro de energía de un

sistema. Históricamente las nuevas fuentes que el hombre ha incorporado siempre han implicado mayor disponibilidad energética para el uso final de la energía. Es decir, que la incorporación de nuevas fuentes de energía es explicable desde el punto de vista de la eficiencia. Los conversores primarios, como elementos centrales de un sistema de provisión de energía, siguen la misma lógica. Si los estudiáramos en línea cronológica, veríamos como brindan rendimientos crecientes en términos de conversión. Como señala Smil (2017), los músculos humanos fueron el único conversor primario durante la evolución de los homínidos. Por esta razón, las sociedades anteriores a la agricultura se organizaban para subsistir a partir de la recolección y la caza limitándose en su desarrollo a la capacidad de energía susceptible de ser convertida por el metabolismo humano. Mediante la apropiación del excedente energético que resultó de la domesticación de los equinos de trabajo (mulas y caballos) y el consecuente desarrollo de tecnología aplicado a los tirajes y arados, se dio el primer cambio de un conversor primario y el uso de energía en la historia del hombre. En el nacimiento de la agricultura estuvo presente una de las primeras transiciones energéticas humanas. La razón que llevó a adoptar un nuevo conversor y una nueva fuente energética fue, como se mencionó en el párrafo anterior, la disponibilidad de mayor energía que se desprende de una fuente más eficiente.

Las ganancias energéticas aportadas por los diversos conjuntos de recursos y conversores primarios, en las transiciones anteriores, determinaron en gran medida las estructuras sociales que hoy conocemos. Fundamentalmente a partir del aprovechamiento intensivo de los hidrocarburos se asentaron las bases de la sociedad global y postindustrial. Este nivel de complejidad social, como indicaba Tainter, requiere de determinados flujos de energía. En la actualidad, un cambio en el conjunto de fuentes y conversores primarios implicaría nuevos arreglos sociales, que, a la luz de las transiciones anteriores, serían sumamente profundos. De este modo, cabe preguntarse hasta qué punto la sociedad está dispuesta a transformarse. El fin último de la presente transición energética está vinculado al mejoramiento o saneamiento de las condiciones medioambientales, lo que podría ser considerado como un fin superior, puesto que sin biosfera o con una sumamente degradada no hay actividad humana posible. Tal como se verá en las secciones dedicadas a los prospectos de la transición energética actual, publicados por las principales agencias internacionales, en un primer estadio de la transición serán necesarios esfuerzos económicos, que al menos transitoriamente, elevarán el costo de la energía generando un nuevo desafío en cuanto a la administración de recursos. Por lo tanto, el éxito de la transición energética, en el contexto actual de globalización e interdependencia, está ligado a la aceptación social que tengan los cambios que de ésta se susciten. El desarrollo, más aún el desarrollo sustentable por su naturaleza duradera en el tiempo, es un proceso, en última instancia, de índole comunitaria y, por lo tanto, basado en el acuerdo como producto social.

La sociedad entra en contacto con la energía cuando se dispone a utilizarla para dar satisfacción a diversas necesidades de sus actores. En otras palabras, podríamos definir que la interacción tiene lugar a partir de los usos finales de la energía. Es fundamentalmente el conversor primario la herramienta que intermedia entre el recurso energético y el uso final de la energía. El conversor primario, a su vez, está delimitado en gran medida por el recurso. Por otro lado, el conversor será determinante de la energía de salida, la que será aprovechada en un uso final determinado. Una de las características sobresalientes de la transición energética actual es el

intento de aprovechar al máximo los recursos solar y eólico. Sus convertidores primarios transforman la energía de dichos recursos fundamentalmente en energía eléctrica. Asistiremos entonces, durante los próximos años, conforme a los planteos de la transición actual a una electrificación acelerada de los usos finales de la energía. Ahora bien, el interrogante que surge en este punto podría ser definido como el siguiente: ¿está la sociedad global postindustrial preparada para una electrificación? Si habíamos afirmado que el uso intensivo de los hidrocarburos durante la revolución industrial dio forma al conglomerado social que hoy conocemos, es válido entonces, preguntarse si el mismo es susceptible de cambiar las fuentes y los convertidores primarios de energía que dinamizan sus procesos de satisfacción de necesidades o bien son estos últimos, los usos finales de la energía, los que deben adecuarse a formas de aprovechamiento energético con menor impacto ambiental.

Las transiciones anteriores implicaron cambios tanto del conjunto recurso-convertidor como de los usos finales determinando un patrón. Es fundamental para una correcta asignación de recursos y planificación de la transición actual incorporar lo anterior a los ejercicios prospectivos y comenzar a preguntarse por la posibilidad de usos energéticos distintos a los actuales.

Densidad de Potencia

Antes de continuar con la definición de los conceptos de Densidad de Potencia y EROEI, conviene aclarar que éstos son parámetros técnicos que permitirán, en una instancia posterior, comparar las fuentes energéticas en cuestión. Como se dijo, es el objetivo de este trabajo de tesis, determinar si la nueva configuración de fuentes del sistema de provisión de energía podría tener efectos limitantes sobre el desarrollo sostenible. Contar con parámetros técnicos para comparar a las fuentes de energía, fundamentalmente las que se proponen como reemplazos, es fundamental para poder arribar a un conjunto de conclusiones útiles.

La densidad de potencia, entonces, es definida por Smil, en su trabajo *Power of Density* (2015), como el espacio requerido por un sistema energético para generar energía o bien transformarla en energía útil. Este concepto ocupa un lugar preponderante en el abordaje de la transición energética que propone el autor a lo largo de su obra. Smil entiende la densidad de potencia como un concepto amplio que serviría, por ejemplo, para la clasificación de los medios de transporte (densidad de potencia de un oleoducto) o conversión (densidad de potencia de una refinería) de energía.

En el siguiente trabajo, entenderemos potencia como el flujo de energía por unidad de tiempo, lo que podemos traducir a *Joules* por segundo, lo que a su vez equivale a un *watt* ($J/s=W$). Como se dijo, la densidad de potencia es una densidad espacial por lo que se expresa como el cociente entre una variable y un área, así es como podemos definir a la densidad de potencia como W/m^2 lo que, es decir, *Joules* por segundo por metro cuadrado.

El espacio como límite a toda actividad humana, presta una posibilidad comparativa excepcional. Los análisis actuales o prospectos de la transición energética no suelen considerar la cuestión del uso de la tierra o del espacio disponible como una variable a interrelacionar, es más, el espacio requerido para la conversión, uso o transporte de una determinada fuente

energética no suele ser una variable de análisis en la evaluación de la performance, aunque el mismo es un límite, aún en aquellos casos de recursos ilimitados, como la energía solar y la eólica.

Smil (2015), citando a los economistas Juan Moreno Cruz y Scott Taylor, indica que quizás el atributo más importante de una fuente de energía sea su densidad de potencia: la capacidad de entregar determinada cantidad de potencia en relación con su peso o dimensiones físicas. La densidad misma del recurso energético que buscamos alimenta nuestros esfuerzos para obtener más del mismo. Por lo tanto, las diferencias en la densidad de potencia entre los recursos energéticos crean grandes diferencias en la oferta de energía. De acuerdo con las fuentes citadas por Smil, la densidad de potencia actuaría como un refuerzo positivo: a mayor potencia entregada en términos relativos, mayor va a ser el interés en perseguir el aprovechamiento de dicha fuente. Este principio permite explicar no solo las transiciones energéticas anteriores sino también el estado actual de la matriz energética global dominada por los hidrocarburos.

La transición energética actual desafía este axioma planteando un redireccionamiento de los esfuerzos, que podrían expresarse también como inversiones, hacia fuentes energéticas cuyo cálculo de densidad de potencia, arroja un resultado relativo menor que el de las fuentes no renovables. En lo que respecta a la demanda de energía, la misma se ha configurado alrededor de una oferta de alta densidad, por lo tanto, se habla también de usos de la energía de alta densidad de potencia. La interrelación entre fuentes energéticas y usos de la energía de alta densidad energética, resultan por lo tanto en una configuración social que gira alrededor de energía altamente concentrada en el espacio.

En una perspectiva cronológica, Smil observa que el desapego de las teorías económicas modernas por la inclusión del factor tierra contrasta con la teoría clásica, cuyo apogeo se dio en un momento de cambio de densidad de potencia en los sistemas productivos (a partir del reemplazo del carbón vegetal por el mineral para la fundición del hierro), dando cuenta del aumento exponencial de la densidad de potencia en las conversiones y, fundamentalmente, en los usos de la energía desde mediados del siglo XIX. Concentración de trabajo y capital, como patrón de la organización económica, se traducen a términos termodinámicos en una expresión de crecimiento en el uso de la energía, de despliegue de nuevas conversiones en escalas e intensidades sin precedentes. Es fundamental comprender este pasaje, dado que nuestra realidad postindustrial no puede ser explicada sin el movimiento anterior y, fundamentalmente, sin el aporte de las fuentes de origen fósil a los procesos de generación, como vectores del cambio de las densidades de potencia. Pensar la transición energética actual es, entonces, pensar en qué medida se podrá realizar el reemplazo de fuentes con alta densidad de potencia por otras de muy baja densidad, en una sociedad articulada a partir de usos energéticos con altísimas densidades.

El espacio de la fuente de generación esta expresado en el denominador del indicador. Uno de los aspectos más complejos del cálculo de este reside en el establecimiento de los límites en lo que refiere a cuanto terreno es necesario para la generación. A modo de ejemplo podemos citar los parques eólicos: por cuestiones de diseño y eficiencia, los parques requieren que la

ubicación espacial de los aerogeneradores (con sus rotores en donde se produce la conversión eléctrica) sobre el terreno, se realice en modo tal que se dispongan distancias libres de elementos que puedan obstaculizar el paso del aire por estos (los generadores, así como determinadas especies arbóreas no deben obstaculizarse entre sí). A su vez, las regulaciones medioambientales de las diversas jurisdicciones establecen que estos deben construirse respetando distancias preestablecidas a establecimientos de vivienda humana o determinadas colonias de aves. Considerar todo el espacio ocupado por el parque eólico para realizar el cálculo de densidad de potencia sería una aproximación práctica. Sin embargo, no arrojaría un cálculo realista en tanto no consideraría los usos posibles de las áreas “libres” de estructuras dentro y alrededor del parque, como pueden ser siembra y pastoreo, si la fertilidad del suelo así lo permite. Entonces ¿Cómo determinar cuál es el área determinada para calcular la densidad de potencia de un parque eólico? La pregunta no tiene una respuesta simple o única y debe ser cuidadosamente analizada, dado que estos espacios que pertenecen a la instalación, pero no contienen construcciones son de consideración y pueden generar variaciones importantes a la hora del cálculo dependiendo si se los haya tomado en cuenta o no.

Circunstancia totalmente opuesta podemos encontrar en el área reclamada por una refinería o una planta de generación eléctrica térmica, donde los límites espaciales son claros y fácilmente delimitables. Smil sostiene en lo que refiere a la calidad de la energía y su relación con la necesidad espacial para generación que los espacios requeridos por las conversiones de energía modernas se podrían organizar jerárquicamente en un espectro que va desde la transformación total de las superficies, no solo por la instalación y construcción de planta e infraestructura sino por la imposibilidad de recuperar el suelo en algún momento futuro, pasando por un rango de impactos que van reduciendo la intensidad de la transformación de los suelos hasta llegar a usos energéticos de la tierra o el agua por parte de la industria de la energía que se basan en la retención de los fines originales de los mismos o alteraciones fácilmente reversibles.

Aún con una visión crítica de la transición energética actual, en términos de los tiempos y objetivos que se plantean desde las principales agencias promotoras de las mismas, compañías del sector energético y estados nacionales, Smil no deja de abogar por la misma poniendo especial énfasis en la cuestión de la calidad energética. La calidad de la energía refiere a los impactos medioambientales que genera la captura, explotación y transporte de los diversos flujos de energía disponibles. La densidad de potencia como indicador (W/m^2) no tiene la capacidad de describir la calidad de la energía. Hay determinados impactos medioambientales vinculados con la energía que tienen una relación directa con el espacio de explotación de la fuente, entre estos podemos mencionar: la duración en el tiempo del proyecto (tiempo durante el cual el espacio estará afectado al aprovechamiento energético), la posibilidad de restitución o no de las superficies a su aspecto, calidad y usos originales o previos a la explotación, las emisiones que resultan de la explotación del recurso y el uso concurrente de espacios, que es entendido como un aspecto positivo de ciertas fuentes (aumenta la densidad de potencia dado que implica no adicionar espacios sino darle un uso energético a superficies que ya están siendo utilizadas).

En este último aspecto podemos mencionar como ejemplo la transformación de energía solar tanto en sus aplicaciones fotovoltaicas como para generación de calor con instalaciones realizadas sobre estructuras preexistentes: techos, terrazas, incluso paredes con revestimiento fotovoltaico. La transformación de energía solar en energía calórica sobre instalaciones preexistentes, con amplísima difusión en Alemania, para citar un ejemplo concreto, es dentro de las transformaciones energéticas correspondientes a las fuentes renovables la que cuenta con mayor densidad potencia. Mauthner and Weiss estimaron que, para fines del 2012, los colectores térmicos de energía solar ocupaban un área agregada de 383 millones de m², una capacidad total de 268 Watts térmicos (Wt) y una producción anual de 225 Tera Watts hora (TWh), lo que implicaba un promedio global de densidad de potencia de 67Wt/ m² (Smil, 2015: P49).

Mas allá de la diferencia en el origen de los recursos que hace a la caracterización principal de las fuentes de energía entre renovables y no renovables, el nivel de emisiones de Dióxido de Carbono (CO₂) de unas y otras constituye la cuestión de calidad energética predominante en la transición energética actual. Siguiendo la bibliografía científica, las publicaciones de divulgación y la opinión pública en general, se podría afirmar que ésta es una transición energética motivada fundamentalmente por cuestiones de calidad energética. Las definiciones, ya citadas, de IRENA y la *Net Zero Coalition* de Naciones Unidas son un claro ejemplo del aspecto central de la calidad energética. De acuerdo con la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA por sus siglas en inglés): “La principal actividad del ser humano que emite CO₂ es la combustión de combustibles fósiles (carbón, gas natural y petróleo) para generar energía y con fines de transporte, aunque ciertos procesos industriales y cambios en el uso de la tierra también emiten CO₂” (EPA,2023). Así mismo, la combustión de los distintitos tipos de carbón e hidrocarburos da por resultado la emisión de óxidos de nitrógeno (N_xO_y), generadores de smog, y varios combustibles líquidos, al ser utilizados, liberan oxido de azufre (SO₃). En el otro extremo del rango de emisiones, la generación procedente tanto de fuentes renovables como de la fisión nuclear no son fuentes directas emisoras de CO₂, aunque si de carbono (C) como resultado de la construcción y mantenimiento de las instalaciones.

La densidad de potencia es un indicador cuya virtud principal consiste en servir como medio comparativo para las transformaciones, los usos y el transporte de energía, a partir de la expresión del flujo de energía en el tiempo por unidad de espacio, y poner de manifiesto la cuestión espacial largamente obviada en los prospectos de la actual transición energética. Sin embargo, como ya ha sido mencionado, este ratio no tiene *per se* la capacidad para expresar cuestiones concernientes a la calidad de la energía. Es por esto por lo que no puede ser utilizado sin hacerse salvedades necesarias, ni aislado de otros elementos que permitan determinar capacidades y rendimientos de recursos específicos de conversión o de todo el sistema energético en estudio.

La introducción de la densidad de potencia, como uno de los parámetros técnicos para comprender la transición energética actual, implica poner de manifiesto otra cuestión, también asociada a la calidad energética: nos referimos al calor residual asociado a las transformaciones de energía. Comprender que la energía no es técnicamente consumida, dado que por la primera ley de la termodinámica la cantidad total de energía en el universo es la misma, es decir a

energía no puede crearse ni destruirse, solo transformarse, nos pone frente a un aspecto no menor cuando se estudia el uso de la energía en relación con la superficie donde esto tiene lugar. Es decir que la densidad de potencia de los diversos usos de la energía no puede obviar la primera ley de la termodinámica ¿Por qué? Porque si la energía no puede ser consumida, sino que se transforma para uso, considerando que no existen rendimientos reales del 100%, entendemos que una parte de la energía transformada necesariamente será disipada en forma de calor: $\Delta U = Q - W$. “Las densidades de potencia de todos nuestros usos finales de energía son también las densidades de potencia de la irradiación de calor. Dependiendo de la intensidad y la escala de esta irradiación y del medio absorbente de calor, tales procesos pueden causar aumentos de temperatura significativos”. (Smil, 2015: P160)².

Estas disipaciones de calor específicas dentro de determinadas áreas, que surgen de los diversos usos de la energía, principalmente transporte urbano y el uso en edificios (la conversión de energía para procurar la temperatura deseada, iluminación y conectividad en un área edificada determinada) pueden ser causantes, en especial en el ámbito urbano y en combinación con otros efectos propios de la urbanización de los terrenos, de lo que se denomina islas de calor permanentes. Aunque las islas de calor urbanas no son los principales motores del aumento promedio de la temperatura en la superficie de la tierra representan un problema real y científicamente comprobable que genera perturbaciones ambientales.

La densidad de potencia, tal como la aborda Smil, al considerar las disipaciones de calor, no solo hace foco en las externalidades negativas de las mismas, sino que también rescata los aprovechamientos de calor residual que incrementan el valor del indicador. El mejor ejemplo de estos procesos son los ciclos combinados en la generación térmica de electricidad. El manejo de la disipación de calor ha sido un hito de relevancia en el manejo de los microprocesadores, siendo el vector fundamental en el incremento de la capacidad de procesamiento de estos. En el mismo sentido la administración de la disipación de calor, hoy por hoy, ocupa un lugar en importante en el diseño y estructuración espacial de los edificios o habitaciones que albergan servidores de datos, para el intercambio y almacenamiento de información.

Habiendo introducido la nociones básicas del concepto de densidad de potencia, su aplicación a la generación de energía y los usos de la misma, señalando también sus limitaciones en lo respectivo a sus apreciaciones cualitativas y las dificultades que determinados cálculos conllevan para establecer correctamente las necesidades espaciales, se presenta una tabla comparativa de procesos que permitirá articular conclusiones en lo que respecta al proceso en marcha de la transición a la luz de las densidades de potencia. Es menester señalar que la siguiente tabla realizada por Smil (2015: P211) representa un agregado de la tierra reclamada por el sistema global de energía al 2010 y las cantidades totales de potencia instalada que se han incrementado considerablemente, así como también los espacios requeridos. Las

² The power densities of all of our final energy uses are also the power densities of heat rejection. Depending on the intensity and the scale of this heat rejection and on the heat-absorbing medium, such processes can cause significant temperature increases. (Smil, 2015:160)

La transición energética como un límite al desarrollo en un contexto de globalización e interdependencia

densidades de potencia no han sufrido variaciones drásticas puesto que no se han introducido tecnologías disruptivas. Es decir, que las adiciones han sido lineales tanto en potencia como en espacio. Para los fines comparativos de esta sección, la información aún es válida dado que los aumentos se dieron tanto en el numerador como en el denominador del indicador.

Tabla 1 - Requerimientos de espacio y potencia instalada del Sistema global de Energía en 2010 (Smil)

Proceso	Potencia	W/m2	~km2
Extracción de combustibles fósiles	13.63 TW		12,000
Carbón Mineral	4.72 TW	1,000	4,700
Petróleo Crudo	5.38 TW	1,000	5,400
Gas Natural	3.53 TW	2,000	1,800
Refinación de Petróleo	5.10 TW	5,000	1,000
Transporte de Combustibles			27,000
Oleoductos	8.03 TW	300	27,000
Terminales (Tanks Farms)	2.21 TW	10,000	200
Terminales de LNG	364 GW	5,000	200
Generación Eléctrica (Térmica)	1.86 TW		2,100
Generación con Combustibles Fósiles	1.54 TW	1,000	1,500
Plantas Nucleares	316 GW	500	600
Energías Renovables	525 GW		398,000
Generación Hidroeléctrica	395 GW	3	131,700
Generación Eléctrica Geotérmica	8 GW	50	200
Generación Solar (medios agregados)	3 GW	5	600
Generación Eólica			
Espacio total reclamado por la instalación	40 GW	1	40,000
Huella del Aerogenerador	40 GW	50	800
Biocombustibles Modernos	79 GW	0.3	263,300
Transmisión Eléctrica	2.30 TW	30	58,000

En una primera aproximación a las densidades de potencia de las fuentes de energía podemos observar una diferencia de 3 o 4 órdenes de magnitud, según el caso, entre las energías de fuente fósil y las energías de origen renovable. Considerando que, en el 2020, el consumo global de energía provenía en un 80% de fuentes fósiles (*BP Statistical Review of World Energy, 2021*), una transición energética que desplace de plano a las fuentes fósiles sería prácticamente imposible en las condiciones tecnológicas actuales sin hacer desplazamientos espaciales dramáticos. Las densidades de potencia relativamente bajas de las energías renovables constituyen uno de los grandes retos de la transición energética actual. Reestructurar una organización sociocultural de altas densidades de potencia en sus usos finales y consumos de energía sin incurrir en cambios en los estándares de vida, es desde un punto de vista meramente físico, imposible.

Las transiciones energéticas que ya han acontecido en la historia del hombre nos invitan a pensar en horizontes de varias décadas y nunca dejando de lado que esta se trata de la primera transición hacia fuentes de menor densidad de potencia. Nos encontramos en un lento movimiento desde energías concentradas hacia flujos dispersos en el espacio.

La relación del hombre con los aprovechamientos energéticos había sido hasta este periodo de la historia fundamentalmente incremental. Como ya ha sido mencionado, el valor intrínseco de las fuentes energéticas históricamente fue dado por la densidad de potencia de estas. La utilización de densidades de potencia mayores, es decir de fuentes que suponen mayor energía concentrada imprimió un carácter determinado a la organización del hombre en sociedad. Este fenómeno se dio de modo natural u orgánico. Desandar el camino de las altas densidades de potencia surge indirectamente como una necesidad planteada por la transición energética actual, cuando se evalúan los valores del indicador para las fuentes y conversiones que se propone priorizar, sin embargo, la cuestión no tiene un carácter central en los prospectos y estudios de mayor circulación, como veremos con posterioridad.

Siguiendo la línea de pensamiento de Smil, en *Power of Density (2015)*, se podría considerar que la transición hacia un sistema global de energía basado exclusivamente en fuentes renovables no es actualmente asequible debido a las limitaciones tecnológicas en la captura de esos flujos energéticos. Aunque un sistema de comercio internacional de energía renovable beneficiaría su desarrollo, las bajas densidades de potencia de estas fuentes no podrían competir con las fuentes fósiles en un mercado de energía internacional. Sin embargo, el éxito de la transición energética se vería favorecido por un mayor grado de electrificación, independientemente de la composición del mix de generación, debido a la eficiencia de la energía eléctrica para satisfacer la demanda en gran parte de los usos finales de la energía. Aunque la descentralización en la generación de energía eléctrica es deseable, las altas densidades de potencia requeridas por las ciudades y la industria dificultan la viabilidad de sistemas descentralizados de baja densidad. Para lograr sistemas de energía renovable dominados por la electricidad en el futuro, se requiere aumentar la eficiencia en el uso final de la energía, desarrollar sistemas de almacenamiento a gran escala para gestionar la intermitencia de las fuentes renovables y encontrar medios asequibles para utilizar la electricidad en la producción de combustibles líquidos, siendo principalmente el hidrógeno uno de los más prometedores a partir de sus altos valores relativos de densidad energética gravimétrica, es decir, la energía contenida por unidad de masa en un combustible. En lo que hace a su densidad volumétrica, todavía hay mucho camino para desarrollar antes de poder ser considerado un combustible comercial.

La conclusión de Smil en su análisis de las densidades de potencia es un corolario que bien puede ser aplicado al estudio de la transición energética que está sucediendo, “las nuevas disposiciones de los flujos energéticos son inevitables y deseables, pero sin duda, si se van a basar en conversiones a gran escala de fuentes de energía renovable, las sociedades dominadas por las megaciudades y la producción industrial concentrada requerirán una profunda reestructuración espacial del sistema de energía existente, un proceso con

importantes consecuencias socioeconómicas y ambientales” (Smil, 2015: P255 traducción propia)³.

A la cuestión globalmente irresuelta de la equidad y la distribución efectiva de recursos escasos se le suma ahora un desbalance entre las necesidades de potencia para el uso de la energía y aquella que las nuevas fuentes son capaces de entregar. En aras del desarrollo sostenible, el límite de potencia que viene dado por las nuevas fuentes renovables puede ser una invitación a repensar los paradigmas de satisfacción de necesidades, como así también el crecimiento como respuesta unívoca a la cuestión del desarrollo.

La transición energética no puede solamente ser un reemplazo de fuentes de energía fósiles por otras de origen renovable. Las fuentes renovables no tienen la densidad de potencia suficiente ni entregan la energía suficiente (como se verá a continuación) para mantener la misma organización de la sociedad que se moldeó a partir de la utilización intensiva de combustibles fósiles. A su vez, estos últimos no solo son finitos, sino que también su utilización conlleva una huella ecológica que, considerando el modo de explotación actual, es totalmente insostenible en el tiempo. La transición energética como límite al desarrollo debe ser tratada como una oportunidad para reestructurar los modelos de desarrollo aspiracionales y poner el foco en la sostenibilidad. Es decir, en aquello que hoy es posible y puede ser mantenido en el tiempo.

EROEI

En este esfuerzo por comprender los efectos que la actual transición energética tendría sobre el desarrollo sostenible, nos hemos de valer también de otro indicador, que al igual que la densidad de potencia — incluso Smil lo utiliza para reafirmar su tesis — suele ser pasado por alto en los debates del *mainstream* sobre la transición e ignorado en la evaluación de viabilidad de proyectos renovables. Nos referimos al nada novedoso criterio de “Energía Neta” o por sus siglas en inglés EROEI (Energy Returned on Energy Invested). Utilizaremos la acepción desarrollada en la publicación “En busca de un milagro: los límites de la “energía neta” y el destino de la sociedad industrial” (Mander y Heinberg, 2009). Rescatamos el valor de la publicación no solo por el detalle y la simpleza con que trata un concepto, que, a diferencia de la densidad de potencia, requiere mayores abstracciones interpretativas e incluso de cálculo, sino también por la incorporación a lo largo de la misma de elementos comparativos de las fuentes de energías que juntamente con el EROEI suponen la introducción de la noción de límite aplicada a la materia en estudio.

El autor principal difusor del EROEI, o tasa de retorno energético, es Charles Hall mientras que Richard Heinberg es uno de sus intérpretes (perteneciente a la línea conservacionista) que lo ha

³New energy arrangements are both inevitable and desirable, but without any doubt, if they are to be based on large-scale conversions of renewable energy sources, then the societies dominated by megacities and concentrated industrial production will require a profound spatial restructuring of the existing energy system, a process with many major environmental and socioeconomic consequences.

utilizado en trabajos de prospección y evaluación de energías alternativas. Heinberg es un autor que ocupa un espacio en lo que denominaríamos el circuito *under* académico, al que no podemos ubicarlo en la línea de pensamiento de las organizaciones multilaterales que plantean los grandes lineamientos y urgencias de la transición energética (IEA u ONU a través de la Conferencia de las Partes) y muchos menos cercano al lobby de la industria del Petróleo y el Gas, diferenciando a este de la OPEC+ (incluye a Rusia) que persigue intereses propios, netamente políticos más que corporativos. Heinberg y su grupo de estudio (al igual que Hall) encarnan una visión que, de alguna manera, viene a rescatar algunos de los principios que fueron condensados en 1972 en el informe al Club de Roma que resultó en *The Limits to Growth* (Meadows, Meadows, Randers y Behrens).

La tasa de retorno energético indica cuánta es la energía neta que se obtiene a partir de cada actividad. Puede ser positiva o negativa conforme la energía de salida sea mayor o menor que la energía de entrada al proceso. La tasa de retorno energético se torna relevante cuando se evalúan los diversos procesos de conversión energética que se dan en una transición. Históricamente los reemplazos de unos sistemas por otros han sido siempre en favor de aquellos con mayor retorno energético, lo mismo que hemos estudiado con la densidad de potencia. En el centro de la teoría del EROEI se encuentra la idea de que el progreso o desarrollo del hombre se ha basado en el aprovechamiento de estos retornos incrementales, los cuales, a su vez, han ido moldeando las estructuras socioculturales actuales, fundamentalmente en occidente. La cuestión por resolver en la transición actual, de acuerdo con la interpretación de Heingberg, sería en qué modo se deben combinar las diversas fuentes con baja o nula emisión de carbono para suplir su menor EROEI frente a las fuentes de origen fósil, que han aportado flujos de mayor retorno energético durante, al menos, los últimos ciento cincuenta años.

La tasa de retorno energético o EROEI al igual que la densidad de potencia es un indicador que permite realizar comparaciones entre diversas energías y a su vez determinar la factibilidad de vincular usos y fuentes. Las energías renovables y de baja o nula emisión de carbono se caracterizan por retornos de energía bajos que incluso, en determinados aprovechamientos, pueden llegar a resultar negativos. Es posible establecer una correlación directa entre la densidad de potencia y la tasa de retorno energético de una fuente determinada: aquellos aprovechamientos de flujos energéticos con menor densidad de potencia necesariamente requerirán mayor energía para que los mismos puedan ser capturados en el espacio y por lo tanto tendrán menores tasas de retorno energético.

El indicador de Energía Neta se obtiene calculando la relación entre la energía obtenida por una labor determinada, como puede ser justamente la explotación de una fuente primaria de energía, y la energía necesaria para realizar la actividad en cuestión, es decir que este indicador intenta determinar cuanta energía extra produce un sistema a partir de aquella que es necesaria para poner dicho sistema en funcionamiento. El EROEI como indicador intenta alumbrar sobre la energía necesaria para obtener la energía que utilizamos y se lo suele representar como la relación entre la energía de entrada y la de salida. En una entrevista, publicada en la revista de divulgación *Scientific American* (abril 2013), Hall estima que, para cubrir las necesidades básicas de una sociedad, incluyendo depreciaciones de capital empleado en términos de energía, se requiere un EROEI agregado de 10:1 o 11:1. Esto implica que el sistema energético

debe aportar 10 u 11 unidades energía por cada una que requiere para funcionar y para que la sociedad pueda ver satisfechas sus necesidades básicas. Para ilustrar este concepto, nos resulta pertinente incluir un fragmento de dicha entrevista (traducción propia).

— **Entrevistador:** Para las fuentes de energía de la sociedad, ¿es importante tener en cuenta el EROI⁴?

— **Hall:** ¿Queda mucho petróleo en el subsuelo? Por supuesto que sí. La pregunta es: ¿cuánto petróleo podemos extraer del subsuelo con un EROI significativamente alto? Y la respuesta es que no tanto. Así que eso es lo que estamos enfrentando a medida que avanzamos más y más mar adentro y tenemos que hacer fracking y perforación horizontal y todo este tipo de cosas, sobre todo cuando te alejas de los puntos ricos de las formaciones de esquisto. Cada vez es más difícil conseguir el siguiente barril de petróleo, por lo que el EROI baja, baja y baja.

— **Entrevistador:** ¿Existe un EROI mínimo?

— **Hall:** Como todo lo que hacemos depende de la energía, no se puede pagar más y más y obtener lo suficiente para que la sociedad funcione. A partir de un cierto rendimiento energético de la inversión -supongo que 5:1 o 6:1- ya no funciona.

— **Entrevistador:** ¿Qué ocurre cuando el EROI es demasiado bajo? ¿Qué se puede hacer con diferentes EROI?

— **Hall:** Si el EROI es de 1,1:1, se puede bombear el petróleo del suelo y examinarlo. Si es de 1,2:1, se puede refinar y analizar. Con 1,3:1, puedes llevarlo a donde quieras y examinarlo. Hemos estudiado el EROI mínimo que necesitas para conducir un camión, y necesitas al menos 3:1 en boca de pozo. Ahora, si quieres poner algo en el camión, como cereales, necesitas tener un EROI de 5:1. Y eso incluye la depreciación (energética) del camión. Pero si quieres incluir la depreciación del camionero, del trabajador petrolero y del agricultor, entonces tienes que considerar al mantenimiento de sus familias. Y entonces necesitas un EROI de 7:1. Y si quieres educación, necesitas 8:1 o 9:1. Y si quieres asistencia sanitaria, necesitas 10:1 u 11:1.

La civilización requiere un rendimiento energético sustancial de la inversión. No se puede hacer con un combustible de mala calidad como el etanol de maíz [con un EROI de aproximadamente 1:1].

El gran problema de las (energías) alternativas (a los hidrocarburos) es que tienen un EROI muy bajo. A todos nos gustaría avanzar hacia los combustibles renovables, pero no va a ser nada fácil. Y puede que sea imposible. Puede que no seamos capaces de mantener nuestra

⁴ En la literatura y artículos tanto periodísticos como de divulgación vinculados a los trabajos de Charles Hall se habla tanto de EROEI (*Energy Returned Over Energy Invested*) como del concepto análogo indicado por el término EROI (*Energy Returned over Investment*).

civilización con estos combustibles alternativos. Espero que podamos, pero tenemos que ser realistas.” (Scientific American, 2013, Ed. Online)

De acuerdo con Richard Heinberg (2009), la mayor parte de la energía que los humanos han utilizado se obtenía a partir de la comida (energía solar capturada y almacenada en las plantas y los animales que las consumen). Con la domesticación de los animales, la energía principal se siguió obteniendo de los alimentos, pero gran parte de estos alimentos eran utilizados para alimentar a los animales, de cuyos músculos se sirvió el hombre. También la energía solar atrapada en las plantas se utilizó en la quema de biomasa para cocina y calefacción. Con mayor cercanía en el tiempo, el hombre logró capturar, otra vez energía solar, almacenada hace millones de años y contenida en los combustibles fósiles. Esta energía comenzó a procesarse en miles de motores que, directa o indirectamente, modificaron todos los aspectos de la vida del hombre. En esta lectura de Heinberg, sorprendentemente liberal por lo evolucionista, los excedentes de energía incrementales capturados por el hombre en su devenir han conducido a la estructura social de alta complejidad dentro de la cual nos encontramos inmersos. Cultura, economía y política se desarrollan a partir de un nivel dado de intensidad energética. La complejidad de nuestra sociedad, global e interdependiente, se explica por la captura incremental de energía solar almacenada en alimentos, bosques y yacimientos de hidrocarburos. Se establece entonces una relación de reciprocidad entre los flujos de energía disponibles y la estructuración o grado de complejidad que se da en una sociedad, una noción compartida por todos los autores que se han ido mencionado a lo largo de este primer capítulo. Por lo tanto, un cambio en la conformación de la matriz energética imperante implicará un cambio en toda la estructura de la sociedad.

Cuando asumimos que la evolución (en términos de complejidad incremental) de las sociedades viene dada por los diferenciales en los esfuerzos de captura de energía, estamos determinado que la evolución social tiene como límite la cantidad de energía neta otorgada por la fuente o sistema energético predominante. Por deducción, aquello que se encuentra limitado en su naturaleza o que tiende a un límite no puede ser tratado como infinito. Aun cuando tratamos con recursos renovables, la energía primaria que podemos capturar de los mismos es limitada por la tecnología de captura disponible. Una noción básica que no tiene lugar en los debates públicos sobre la transición, como señala Jerry Mander (2009), en el prólogo al estudio de Heinberg, al referirse a las instituciones imperantes en el pensamiento de la transición energética:

“(…) creyendo en la primacía y la eficacia del crecimiento económico como indicador clave de bienestar del sistema, incluso a la luz de unos recursos en continua disminución. No sería necesaria, según este dogma, aceptar la realidad de que un crecimiento económico en continua expansión es en realidad un absurdo en un sistema finito, algo ridículo (...).” (Heinberg, 2009, P:5)

La premisa fundamental detrás del concepto de Hall, y acentuada por Heinberg, es que, si bien actualmente utilizamos más fuentes de energía que en el pasado, el límite sigue siendo nuestra capacidad de obtener más energía, es decir los esfuerzos para capturar energía no deben ser

superiores a la energía obtenido. Heinberg introduce nueve criterios comparativos para los sistemas energéticos y sus límites, adicionales al EROEI, que es aquel en el que hace mayor énfasis. A partir estos criterios comparativos o de evaluación, el autor sostiene que es posible llegar a comprender en profundidad la naturaleza de una fuente energética y, fundamentalmente, sus límites.

- Costo monetario directo: su análisis debe tener en cuenta que no siempre el costo real de una energía se refleja en el precio de esta, por interferencia de subsidios y la presencia de externalidades negativas no monetarias, por ejemplo, el costo ecológico que puede tener su explotación. La mayor parte de la literatura sobre el desarrollo sostiene que la energía debe ser asequible y con precios competitivos para ser útil a la sociedad.
- Dependencia de otros recursos: se refiere a la disponibilidad de los materiales o recursos que se necesitan añadir para poder transformar un recurso en una en una fuente de generación de energía. Considera también la complejidad y el costo de la tecnología requerida en las distintas etapas de captura, como factores limitadores importantes en la mayor parte de los sistemas energéticos, principalmente aquellos asociados a las etapas iniciales.
- Impactos medioambientales: cuando el hombre captura un recurso y lo convierte en energía primaria está modificando el medio en el que se desarrolla. Toda fuente de energía tiene impacto medio ambiental. Algunas capturas tienen externalidades más negativas que otras o los impactos pueden no ser reversibles. Este punto está asociado a la calidad de la energía, antes mencionada según Smil.
- Capacidad de renovación: el recurso energético es renovable o no renovable de acuerdo con los tiempos humanos. La energía solar, que domina también la energía eólica, es una fuente renovable, perpetua para el hombre. Sin embargo, las tecnologías para poder capturarla no lo son.
- Tamaño potencial o escala de contribución: las cantidades de energía que pueden ser capturadas considerando la tecnología disponible y el costo económico de dicho proceso determinan la cantidad de reservas diferenciándose éstas del recurso en sí mismo, que rara vez puede ser explotado en su totalidad debido a los límites mencionados. El cálculo de reservas para hidrocarburos es un proceso bastante transparente, regulado por diversas normativas y con mucho historial. En cuanto a las fuentes renovables, principalmente las de mayor tamaño potencial, como solar y eólica, la conversión a reservas se torna más compleja por la naturaleza intermitente de las mismas y el incipiente desarrollo de medios de almacenamiento o vectores energéticos que puedan almacenar al recurso convertido (hidrógeno).
- Localización del recurso: la ubicación del recurso en relación con el lugar de consumo está presente en todos los sistemas energéticos como límite a sus desarrollos. Cabe aplicarlo a fuentes renovables y no renovables. En el caso de los hidrocarburos, por haber sido el sistema predominante durante casi ciento cincuenta años, cuentan con una infraestructura de transporte altamente desarrollada, aunque aún no llega a ciertas áreas remotas. A su vez, sus densidades energéticas favorables, tanto a nivel volumen como masa, han facilitado su movimiento. Smil trata la cuestión en profundidad cuando analiza la viabilidad de sistemas descentralizados de generación eléctrica. Heinberg, sostiene en la misma

dirección de Smil, que la implementación de un sistema energético distribuido o descentralizado de escala sería de una profundidad y magnitud que necesariamente deberían modificar el estilo de vida predominante (fundamentalmente) en occidente tal y como lo conocemos.

- **Fiabilidad:** se refiere a la continuidad o la intermitencia de la generación. Fuentes intermitentes como el sol o el viento, así como las mareas y las corrientes submarinas no permiten alimentar a la tecnología de generación en forma continua, por lo que se debe lidiar con sistemas de almacenamiento.
- **Almacenamiento:** Cuestión trascendental a todo sistema energético, ya sea que se alimente de fuentes intermitentes o no intermitentes. Impacta directamente en los costos de capital de éste, aunque el modo en que Heinberg lo analiza es más que nada como un límite en los sistemas renovables. Es un punto de evaluación sumamente amplio, con mucha repercusión en estos días a partir del advenimiento de diversos prospectos que estudian la viabilidad de los vectores para el almacenamiento energético, desde campos electromagnéticos de proporciones descomunales a la hiper publicitada economía del hidrógeno.
- **Densidad Energética:** cantidad de energía que se puede obtener de una unidad de peso, volumen o área estándar de un recurso energético. Las diversas densidades deben ser consideradas especialmente a la hora de determinar que uso energético será satisfecho con que recurso o tecnología de generación. La densidad energética es un concepto hermanado con la densidad de potencia de Smill que ya hemos analizado en detalle. Aunque es destacable que este último se presenta como una idea más sistémica y menos puntual que la presente. En todo caso es un elemento que no puede pasarse por alto en un análisis comparativo de fuentes de energía.
- **Transportabilidad:** Se refiere a la facilidad o no con que un recurso energético puede ser transportado o bien las conexiones de transporte con las que cuenta una fuente de energía. El estado físico del recurso (gaseoso, sólido o líquido) así como la locación geográfica de la fuente juegan un papel importante en la determinación de este parámetro.

Habiendo mencionado los criterios comparativos que plantea Heinberg, resulta interesante recordar que es estos pueden considerarse como límites aplicables a todas las fuentes y sistemas de energía, sin distinción de renovabilidad o impacto medioambiental. Como ya ha sido mencionado, la subsistencia de una sociedad depende en gran medida de su capacidad para obtener más energía que aquella invertida en obtenerla. En términos energéticos, las sociedades requieren, para subsistir como tales, que la energía obtenida sea mayor que aquella que invierte en obtener la propia energía. El output energético debe exceder al input tanto como sea posible, puesto que el neto resultante determina la energía disponible que se puede emplear para realizar más trabajo. Podemos racionalizar a la energía neta como el beneficio de energía que se espera obtener a partir de la inversión de recursos en la captura de los diversos flujos energéticos. Como bien señala Heinberg, el concepto de energía neta tiene gran semejanza

con su concepto homónimo, en términos económico-financieros, que sería el ROI (retorno sobre la inversión o *return over investment*). Mantener un retorno de energía sobre la energía invertida positivo es tan importante para los productores de energía como para la sociedad en su conjunto.

En otros términos, es posible explicar el devenir de las sociedades a partir del incremento de la energía neta disponible. Cuando la porción de energía que se dedica a la captura energética es menor en relación que aquella que se obtiene se pueden destinar mayores esfuerzos, trabajo, es decir energía, a diversas actividades u ocupaciones especializadas no asociadas a la producción de energía. Así se da el fenómeno de complejización social mencionado en reiteradas ocasiones a lo largo del capítulo. El mejor ejemplo de lo que se acaba de mencionar es el paso de la sociedad preindustrial a la sociedad industrial acelerado por el reemplazo de la biomasa por combustibles fósiles y su elevado EROEI. El principio anteriormente mencionado, tal como lo demuestra la historia del hombre, es independiente del tipo de energía del que dependa la sociedad. En los primeros asentamientos humanos, a partir de la extensión de la agricultura como medio de subsistencia y por tanto de obtención energética, habiendo incluso ya dominado otras fuentes de energía, gran parte de la población debía dedicarse a la actividad agrícola, el reemplazo de la tracción humana por la energía muscular animal incrementó el EROEI y por tanto la especialización de aquellas sociedades pudo ampliarse. La cuestión por manifestar es el punto hasta el cuál los diversos retornos de energía netos dan lugar a las diversas combinaciones sociales.

Las fuentes de energía renovables y no renovables están sujetas al principio de la energía neta bajo análisis. Desde la perspectiva que propone Heinberg, las fuentes primarias fósiles están arrojando EROEIs cada vez menores, lo cual también es comprobable si se compara la densidad de potencia de los primeros yacimientos de hidrocarburos contra los actuales; aún sin incluir el rendimiento naturalmente menor de las explotaciones no convencionales, este hecho, que supone un límite físico a la fuente de captura de energía neta sobre la que se cimienta la organización social global, implica que la transición energética debería realizarse mientras haya suficiente energía neta disponible para continuar satisfaciendo la demanda actual de energía al tiempo que se garantiza la disponibilidad necesaria para el proceso de transición en sí. Siguiendo al autor, si la energía neta de todas las fuentes de energía combinadas disminuye, cada vez existirán más limitaciones para el crecimiento económico, y también para implementar nuevas estrategias adaptativas a la falta de energía. Puede suceder entonces que las sociedades no sean capaces de proveer adecuadamente de fondos a ambos conjuntos de necesidades simultáneamente.

Heinberg realiza un análisis comparativo de dieciocho fuentes de energía (petróleo, carbón mineral, gas natural, hidroeléctrica de gran escala, nuclear, biomasa, eólica, solar fotovoltaica, solar térmica activa (de concentración), solar pasiva (asociada al uso de la radiación para calor e iluminación en el diseño de edificios), geotérmica, generación a partir de desperdicios, etanol, biodiesel, *tar sands*, *shale oil*, mareomotriz y undimotriz), utilizando los criterios de comparación antes mencionados, con énfasis en el EROEI de las mismas. Allí se documenta el deterioro de la energía neta proveniente de los hidrocarburos, con un EROEI para el petróleo de 19:1 a nivel global en 2005, luego de haber gozado el petróleo norteamericano, por ejemplo, de un EROEI

La transición energética como un límite al desarrollo en un contexto de globalización e interdependencia

de 100:1 hacia 1930. El carbón mineral, también en los Estados Unidos, a principios del siglo XX, redondeaba una energía neta media de 177:1 que luego decreció hasta un rango, que, de acuerdo con la calidad del mineral, oscila entre 85:1 y 50:1. Para el gas natural convencional los valores están cercanos a 10:1, aunque, éstos son incluso menores, como ya ha sido indicado, en los casos donde se analiza la extracción del recurso de modo no convencional.

La energía hidroeléctrica y nuclear pueden ser analizadas en un subgrupo, que podría denominarse aprovechamientos de baja emisión de carbono y alto impacto ambiental. En lo que respecta a la energía hidroeléctrica, el EROEI de los diversos aprovechamientos se encuentra en el rango de entre 11,2:1 y 267:1 con variaciones importantes conforme al sitio. El EROEI de emplazamientos con condiciones favorables puede ser extremadamente alta, aunque también debe ser considerado el costo de los impactos socioambientales que una gran presa puede generar. Al igual que en el caso del indicador de densidad de potencia, la calidad de la energía no es representada directamente por el EROEI. El hecho de que los emplazamientos con las mejores condiciones para el aprovechamiento hidroeléctrico ya hayan sido utilizados (Heinberg habla de un tercio de los posibles a nivel mundial), sumado a su elevado costo de capital e impacto ambiental, no hacen de la energía hidroeléctrica un participante futuro en la transición energética, aun cuando su potencial, desde el punto de vista de los indicadores, remarcando la capacidad de almacenamiento en algunos casos (presas), la hacen siempre una opción cuanto menos numéricamente interesante.

Suerte parecida corre la energía nuclear en el trabajo de Heinberg, donde el análisis de esta se basa en una descripción de sus riesgos operativos, sus altos costos de inversión y de erogaciones energéticas iniciales, así como también al uso de agua como refrigerante del calor residual, sin pasar por alto el hecho de que el uranio, combustible de las reacciones nucleares es un recurso no renovable. En lo que refiere al EROEI, cita un informe de Hall (2008, "The Energy Return of Nuclear Power," Appendix F, *The Oil Drum*, 2008, www.theoil Drum.com/node/3877) en donde el autor concluye que la "información más fiable sobre los mismos es bastante vieja (mostrando resultados en el rango de 5 a 8:1), mientras que la más nueva es o muy optimista (15:1) o muy pesimista (baja, incluso menos que 1:1)" (Heinberg, P36).

La situación de la Energía Nuclear en la transición energética

En este punto consideramos relevante realizar un apartado para introducir algunas cuestiones vinculadas a la energía nuclear. Consideramos relevante destacar la postura de la Agencia de Energía Nuclear (NEA, por sus siglas en inglés Nuclear Energy Agency), un organismo dependiente de la OCDE (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos) explicitada en su documento *Meeting Climate Change Targets: The Role of Nuclear Energy*:

La energía nuclear suele quedar excluida del discurso público y político, lo que plantea importantes retos para el sector nuclear. Incluso los países que incluyen la energía nuclear en sus planes energéticos

actuales y futuros a menudo guardan silencio sobre el papel de la energía nuclear en los foros internacionales sobre energía limpia y cambio climático. Esta dinámica es profundamente problemática. La energía nuclear debe incluirse junto a otras opciones en los debates sobre la transición energética para mantener la integridad y la base empírica del diálogo político. Aunque los responsables de la política energética pueden tomar decisiones basadas en valores diferentes sobre el papel de la energía nuclear en sus respectivos contextos nacionales, los análisis y evaluaciones que informan los debates políticos deben ser completos y basados en pruebas. Incluir todas las opciones en los análisis es necesario para garantizar que las complejas compensaciones entre opciones puedan comprenderse y contemplarse con precisión.⁵

Consideramos que el párrafo citado es interesante por demostrar como el propio sector nuclear reclama una mayor participación en la discusión sobre la transición energética actual y resaltar la necesidad de mantener debates políticos alrededor de la transición íntegros y basados en evidencia empírica, es decir desideologizados. Esto último, resulta una de las bases que para que el proceso social que se enfrenta e implica necesariamente un profundo cambio en las conductas y los hábitos predominantes, fundamentalmente, en el hemisferio occidental, sea legitimado por la ciudadanía.

En la transición energética actual, la energía nuclear ocupa un lugar debatido y variable según las políticas energéticas y las condiciones de cada país. Su posición está influenciada por varios factores:

- Baja emisión de carbono: La energía nuclear es una fuente de energía con bajas emisiones de gases de efecto invernadero durante la generación de electricidad, lo que la hace atractiva en la lucha contra el cambio climático.
- Producción de energía estable: Las plantas nucleares pueden proporcionar una cantidad considerable y estable de electricidad, independientemente de las condiciones climáticas, lo que las hace una fuente de energía base que puede complementar a los renovables intermitentes como la solar y la eólica.
- Eficiencia energética: La energía nuclear tiene una alta densidad energética, lo que significa que una pequeña cantidad de material nuclear puede generar grandes

⁵ Nuclear energy is often excluded from public and political discourse, creating significant challenges for the nuclear sector. Even countries that include nuclear in their existing and future energy plans often remain silent on the role of nuclear in international clean energy and climate change fora. This dynamic is deeply problematic. Nuclear energy must be included alongside other options in discussions about energy transition in order to maintain the integrity and evidence base of the policy dialogue. While energy policy makers may take different values-based decisions on the role of nuclear energy in their respective national contexts, the analyses and assessments that inform policy debates must be complete and evidence-based. Including all options in the analyses is necessary to ensure that the complex trade offs between options can be accurately understood and contemplated.

cantidades de electricidad, lo que la convierte en una opción eficiente en términos de uso de recursos.

- Independencia energética: La energía nuclear reduce la dependencia de los combustibles fósiles importados, lo que puede mejorar la seguridad energética de un país.
- Desafíos y preocupaciones: Sin embargo, existen preocupaciones significativas relacionadas con la seguridad, la gestión de residuos nucleares, los costos de construcción y la posibilidad de accidentes nucleares, lo que ha llevado a cuestionamientos sobre la viabilidad a largo plazo de esta fuente energética. A lo anterior debe incorporarse los temores que implica un potencial nexo entre el uso de tecnología nuclear para la generación de energía y la proliferación de armas nucleares, ya que algunos subproductos del proceso de generación de energía nuclear pueden ser utilizados para la fabricación de armamento.

Varios países han optado por dar un papel importante a la energía nuclear como parte de su estrategia en la transición energética. Algunos de los estados que han mantenido o ampliado su enfoque en la energía nuclear son:

- Francia: Históricamente, Francia ha sido uno de los principales impulsores de la energía nuclear. La mayoría de su electricidad proviene de plantas nucleares. La política francesa ha priorizado la energía nuclear como una fuente estable y baja en emisiones de carbono. Sin embargo, hay planes para reducir su dependencia nuclear en el futuro y aumentar la proporción de energías renovables.
- China: Ha estado expandiendo su capacidad nuclear significativamente como parte de su mezcla energética. Ha invertido en la construcción de nuevas plantas nucleares y tiene planes ambiciosos para aumentar su capacidad nuclear en los próximos años. China busca reducir su dependencia de los combustibles fósiles y reducir las emisiones de carbono, y la energía nuclear se considera una parte integral de esta estrategia.
- Rusia: se trata de otro país que ha mantenido y expandido su enfoque en la energía nuclear. Ha estado construyendo nuevas plantas nucleares y ha estado involucrado en la exportación de tecnología nuclear a otros países. La energía nuclear es una parte importante de la matriz energética rusa.
- Corea del Sur: Se trata de un estado que depende en gran medida de la energía nuclear para su generación de electricidad. A pesar de algunos problemas y cuestionamientos públicos después del accidente de Fukushima en Japón en 2011, Corea del Sur ha mantenido su compromiso con la energía nuclear, aunque planea reducir su proporción en la mezcla energética a largo plazo y aumentar las energías renovables.

Por otro lado, nos encontramos también con otros países relevantes en el concierto de las naciones que han tomado el camino de reducir su dependencia de la energía nuclear como parte de su transición energética. Algunos de los estados que han mostrado intenciones de disminuir o eliminar gradualmente la energía nuclear son:

- Alemania: Después del accidente en la planta nuclear de Fukushima en Japón en 2011, Alemania decidió cerrar todas sus plantas nucleares para 2022 (El 15 de abril de 2023

se desconectaron las últimas 3 centrales que se encontraban en operando en Alemania luego de la decisión mencionada). Este movimiento fue parte de la política energética conocida como "Energiewende" (transición energética), que busca aumentar el uso de energías renovables y reducir las emisiones de carbono.

- Suiza: Suiza ha adoptado una estrategia de reducción gradual de su dependencia de la energía nuclear. Decidió no reemplazar las plantas nucleares que alcanzan su vida útil y está enfocando sus esfuerzos en el desarrollo de fuentes renovables y la eficiencia energética.
- Bélgica: Bélgica también ha tomado medidas para reducir su dependencia de la energía nuclear. Anunció planes para cerrar gradualmente sus reactores nucleares más antiguos y aumentar la proporción de energías renovables en su mezcla energética.

Desde la NEA se sostiene que la energía nuclear es capaz de jugar un rol clave en la transición energética actual (partiendo de la motivación netamente medioambiental que ya ha sido señalada como leit motiv) y se propone la noción de sistemas de energía híbridos, con una fuerte apuesta a la integración en los mismos de nuclear e hidrógeno. El sistema energético híbrido se puede referir a escenarios en donde una fuente de energía provee usos múltiples de generación (como por ejemplo calor y electricidad), también es un concepto que aplica en contextos donde se integran múltiples fuentes de energía para suministrar energía confiable (como energías renovables variables combinadas con baterías y diésel de reserva para suministrar electricidad a una microrred remota) y finalmente se podría aplicar esta idea a situaciones que presentan múltiples fuentes de energía integradas para proporcionar una combinación de *outputs* (como sería el caso de una combinación entre energías renovables variables y energía nuclear integradas para proporcionar energía a una red y producir hidrógeno).

En el ya citado documento de la NEA bajo análisis se sostiene que "Los sistemas energéticos híbridos son sistemas diseñados para maximizar la utilización del combustible y la rentabilidad en todos los sectores, así como la confiabilidad general del sistema (Arent et al., 2021). Estos tipos de sistemas son más complejos e implican interacciones dinámicas y de escala múltiple. En lo que respecta a los sistemas híbridos de energía nuclear son sistemas energéticos híbridos que incluyen energía nuclear, para aplicaciones eléctricas o no eléctricas" (NEA, 2022, P. 29). Dentro de los esquemas de sistemas híbridos los aprovechamientos nucleares tienen la posibilidad de pivotar entre la generación de electricidad y la de calor en función de señales de precio y optimización del sistema. Esta flexibilidad inherente a la generación nuclear implica factores de capacidad elevados. Por tanto, estos modos operativos pueden tener un impacto positivo en la economía de la energía nuclear.

Con respecto a los documentos seleccionados que serán trabajados en el segundo capítulo de la tesis y sus menciones a la energía nuclear, consideramos interesante remarcar la diferencia sustancial de abordaje que se da entre *el Net Zero by 2050* de IEA y el WETO 2022 de IRENA. Mientras la IEA le da un lugar preponderante a la energía nuclear en la transición energética remarcando las necesidades de inversión en nueva generación y acondicionamiento de las existentes en los países desarrollados y apuesta fuerte por la energía nuclear modular en

regiones no desarrolladas, IRENA no otorga un lugar relevante a la energía nuclear en ninguna de las seis avenidas tecnológicas planteadas y su foco en relación a la misma está en la necesidad de reubicación de mano de obra proveniente del sector nuclear dada su reducción en el ejercicio prospectivo que se realiza.

Nos encontramos con una divergencia interesante entre tres organismos: NEA, IEA e IRENA que en cierto modo tienen un vínculo directo con la OCDE. La autarquía e independencia de los entes en el ámbito de esta organización podría darse por probada.

Dada la variabilidad de usos y aprovechamientos que supone la biomasa, Heinberg (que engloba dentro de esta fuente tanto al carbón de origen vegetal como al biogás pasando por la combustión directa de residuos forestales, aunque no incluye a los pellets ni las briquetas obtenidas como subproductos energéticos de la foresto industria) no propone un EROEI calculado para esta. Sin embargo, señalamos que, aunque con una baja densidad energética por volumen, tanto la madera, como el carbón vegetal y/o los residuos agrícolas no dejarán de tener una participación respetable como fuentes de energía primaria para usos de cocción y calefacción principalmente en los países en vías de desarrollo. Incluso se buscarán soluciones cada vez más eficientes a nivel local y regional, ya que este tipo de energía supone un bajo costo y una buena capacidad de renovación. En este sentido, como se notará en la sección dedicada a los prospectos sobre la transición energética, nos encontraremos con propuestas que van en esta dirección promovidas por la Agencia Internacional para las Energías Renovables (IRENA, por sus siglas en inglés), donde se mencionan aprovechamientos de biomasa asociadas con estrategias de captura y secuestro de carbono.

La energía eólica, en lo referido al EROEI, es caracterizada con una media obtenida a partir de estudios a nivel global (funcionales y conceptuales) con valores que oscilan entre 18,1:1 para los estudios funcionales y 24,6:1 para los conceptuales, situándose así, como la fuente renovable con mejores retornos de energía neta. Una vez más cabe señalar las cuestiones de intermitencia y el manejo de esta con respecto al despacho de la electricidad generada a la red como sus mayores limitantes.

En cuanto a la segunda “gran renovable”, la energía solar, hay que diferenciar dos aprovechamientos activos, solar fotovoltaica y solar térmica activa o de concentración, y uno pasivo que es asociado a la capacidad de utilizar la radiación para usos de calefacción e iluminación a partir del diseño de los edificios. Con pocos análisis de energía solar fotovoltaica neta, se hacen aproximaciones de su EROEI en torno al 3,75:1 y 10:1 con mucha dependencia de la localización del recurso, algo similar a lo que sucede con la densidad de potencia. Misma suerte corre la energía solar concentrada, dado que la poca cantidad de aprovechamientos no permite hacer una estimación precisa de su EROEI, sin embargo, se estima que sus valores serían relativamente altos. Es los escenarios de transición que propone, Smil hace mucho énfasis en la densidad de potencia de estos aprovechamientos y su potencial de aprovechamiento de instalaciones preexistentes.

Los biocombustibles, bioetanol y biodiesel se analizan por separado, y no en conjunto con la biomasa más allá de ciertos aspectos comunes, como el origen común en cuanto al recurso

(cultivos energéticos) y sus bajos retornos energéticos. La razón de Heinberg para analizarlos como una alternativa energética distinta a la biomasa viene dada por el lugar preponderante que ocupan los beneficios otorgados a los mismos en las políticas gubernamentales de las principales economías mundiales. Con inputs energéticos extremadamente altos, debido a la depreciación de la maquinaria de la agrícola por el uso, el transporte de la materia prima y el producto terminado y el consumo de combustibles de fuentes fósiles, así como la energía necesaria para concretar sus transformaciones energéticas, los biocombustibles también compiten con el uso alimenticio de algunos cultivos energéticos. Hablamos de una fuente de energía que podría limitar en cierto punto la disponibilidad del alimento, que constituye la fuente de energía primaria para el hombre. Los biocombustibles no son buenas opciones en términos de EROEI, tampoco en desde el punto de vista de la densidad de potencia y en general la literatura del desarrollo sustentable los mira con desconfianza porque se trata de energía que se genera con productos que también son alimentos. Hay una coincidencia bastante amplia en este aspecto, cuando se dice que los biocombustibles compiten con el alimento por el uso de suelo.

El etanol, calculado a partir de la producción de maíz en Estados Unidos, tiene retornos que van desde cifras negativas, es decir menores a 1:1, a 1,8:1. El mismo producto, pero producido en Brasil a partir de caña de azúcar puede llegar a entregar energía en una proporción de 8:1 a 10:1. El biodiesel por su parte, que se obtiene a partir del aceite de soja, retorna 1,93 unidades de energía por cada una utilizada para producirlo, mientras que el de maíz (no es un aceite recomendable para la producción de biodiesel pero es el utilizado en la ejemplificación del autor) reporta tan solo un 25% de energía neta, es decir 1,25:1.

La explotación no convencional de recursos fósiles no solo se reduce a las técnicas de *fracking* que se utilizan para la obtención de petróleo y gas en yacimientos donde las condiciones de permeabilidad y porosidad de la roca madre no permitieron la migración de los hidrocarburos hasta un punto determinado por una trampa geológica. Los aprovechamientos no convencionales de hidrocarburos también incluyen la explotación de *tar sands* (arenas asfálticas) y *Shale oil* (esquistos bituminosos).

Las *tar sands* (arenas asfálticas) también son conocidas como arenas bituminosas y su extracción se caracteriza por la gran cantidad de recursos energéticos que es necesario erogar durante la misma. El producto de esta explotación se denomina crudo sintético y la producción de un barril puede llegar a requerir aproximadamente 34 metros cúbicos de gas natural durante todo el proceso. Los cálculos más actuales de EROEI sugieren retornos de energía neta variables entre 5,2:1 y 5,8:1. Si se lo compara con la producción convencional de petróleo, estos valores se encuentran un orden de magnitud por debajo. En cuanto al *Shale oil* (esquistos bituminosos o bitumen) se trata en términos corrientes de petróleo al cual le “falta tiempo de cocción”. El bitumen es un hidrocarburo que no recibió suficiente presión, temperatura o tiempo para llegar a la fase de petróleo crudo. Las deficiencias de presión y temperatura, asociadas a la profundidad, se pueden deber a carencias en la formación del yacimiento. Sus cadenas de hidrocarburos son más cortas, aunque puede ser refinado en refinarias convencionales. Se caracteriza por una densidad energética relativamente baja (un sexto del carbón mineral, que

es el hidrocarburo con mejores valores en este indicador) lo que resulta en magros retornos de energía neta, entre 1,5:1 y 4,8.

Finalmente, Heinberg incluye en su análisis de diversas fuentes energéticas y sus respectivos EROEI a las que provienen del mar. Recordemos que es posible transformar el movimiento de las aguas oceánicas, las corrientes marinas y las olas, en energía eléctrica. Estos aprovechamientos no son recientes en términos de uso de la energía, tampoco lo es su conversión a energía eléctrica. Su utilización siempre ha generado expectativa entre los cultores de las energías renovables y tienen potencial suficiente, especialmente la energía mareomotriz, como para ser consideradas en el tan ansiado “mix de renovables”. No hay información concluyente, fundamentalmente por falta de estudios y la cantidad de proyectos en pleno funcionamiento, para determinar el EROEI de estas energías renovables, aunque de acuerdo a las estimaciones del autor, en función de la capacidad de los generadores de corriente de marea, se podría sugerir un valor medio, similar al eólico, de 18:1. Los generadores de corriente de marea se comportan como generadores eólicos invertidos, aunque se debe considerar su mayor costo de instalación y mantenimiento por efecto de la corrosión marina. La utilización de instalaciones de barrera, donde se embalsa submarinamente una cantidad de agua y luego se aprovecha una diferencia de profundidad para turbinar el caudal capturado, podría, una vez más por comparación, esta vez con los aprovechamientos hidroeléctricos de superficie, tener retornos de energía neta que van del 11,2:1 a 267:1, en locaciones específicas. El elevado costo de instalación y capital que suponen estos sistemas, sumado a que las locaciones donde pueden instalarse y obtener rendimientos considerables no abundan, dejan a esta fuente en un estado de expectación permanente. El segundo aprovechamiento energético basado en el movimiento del agua del mar es la energía undimotriz. Este se basa en la captura de la energía de las olas y su transformación en corriente eléctrica. Con poco desarrollo, instalaciones dedicadas a la captura del flujo y escasos estudios vinculados a su retorno de energía neta, una estimación, calificada como grosera por el propio autor, la sitúa en 15:1.

En este punto de la tesis, entendemos que vale la pena incluir otro sistema energético que, si bien no es tratado en la obra de Heinberg que ha sido seleccionada como referencia principal del apartado, es de suma importancia por el papel otorgado al mismo por los sectores más importantes que participan de la transición energética. Nos referimos al hidrógeno.

Una mirada más cercana al hidrógeno

En su informe Geopolitics of the Energy Transformation: The Hydrogen Factor (2022) IRENA señala que el hidrógeno es el elemento más liviano, antiguo y abundante del universo. El hidrógeno está presente tanto en el agua como en los combustibles fósiles. El hidrógeno es un gas (a presión y temperatura ambiente) que se utiliza primariamente como una materia prima en la industria petroquímica. Su utilización tiene lugar en lo que se conocen como procesos de tratamiento (remoción del azufre y otros elementos no deseados en los productos finales) así también como en procesos de mejoramiento de las cadenas hidrocarburos (crackeo con hidrógeno). El aprovechamiento energético del hidrógeno puede darse a partir de su utilización directa como combustible, en donde el mismo es quemado liberando grandes cantidades de energía térmica sin producción de dióxido de carbono, o bien, es susceptible de ser

transformado energéticamente en celdas de combustible de hidrógeno (Fuel Cell). En estos dispositivos, el hidrógeno se oxida al combinarse con el oxígeno proveniente del aire, generando electricidad, calor y vapor y agua. Una vez más se observa un proceso de conversión energética libre de emisiones de CO₂.

Más allá de su abundancia no existen grandes cantidades de hidrógeno en la tierra que permitan su extracción. El hidrogeno se obtiene de aquellos compuestos en los cuales el elemento está presente. Los compuestos desde los cuales se parte para obtener el hidrógeno son fundamentalmente el agua y los hidrocarburos. La cuestión es que este proceso requiere energía. Como ya ha sido indicado en este trabajo, a partir del origen de la energía utilizada en el proceso de conversión se caracteriza al hidrógeno con un color determinado. Es importante señalar que actualmente, de acuerdo con el citado informe de IRENA, el 95% del suministro de hidrogeno se basa en hidrógeno gris, es decir que se produce a partir de procesos de reformado (alteración de la estructura molecular) de gas natural utilizando a su vez energías de origen fósil sin captura y secuestro de carbono en el proceso productivo. El planteo de la transición energética actual tiene dos objetivos claros en relación con el hidrogeno (que se encuentran por encima de las medidas puntuales desarrolladas en la quinta avenida tecnología de IRENA): Instaurar al hidrógeno verde, por su nula emisión de CO₂ durante el proceso productivo, como la forma de hidrógeno preferencial y a su vez hacer del hidrógeno un componente energético fundamental de la nueva matriz energética.

Más allá de la preferencia por el hidrógeno verde, los especialistas en la materia sostienen que, si hidrógeno azul es capaz de cumplir con criterios de emisiones estrictos, puede ayudar a incrementar la producción del elemento en el mediano plazo, colaborando con el desarrollo de infraestructura y tecnología a lo largo de la cadena de valor. El volumen extra aportado por el hidrógeno azul jugaría además un rol importante agregando flexibilidad al mercado si llegase a ver escenarios de escasez.

En un artículo de diciembre de 2022 titulado “La Década del Hidrógeno” publicado en la sección Finanzas y Desarrollo del sitio web del Fondo Monetario Internacional, Thijs Van de Graaf (autor principal del informe de IRENA citado con anterior) sostiene que el hidrógeno limpio podría cambiar drásticamente la geopolítica de la energía. Existiría la posibilidad de que se articule una nueva geografía del comercio en torno al hidrógeno limpio y sus derivados, tales como el amoníaco. Los países dotados de abundante sol y viento podrían emerger como grandes exportadores de combustibles verdes o zonas de industrialización verde. La competencia industrial podría intensificarse a medida que los países aspiren al liderazgo tecnológico en torno a segmentos clave de la cadena de valor del hidrógeno. En general, el crecimiento del hidrógeno limpio podría fomentar una intensa competencia geoeconómica, estimular nuevas alianzas y colaboraciones, y engendrar nuevos nodos de poder en torno a futuros centros de producción y uso de hidrógeno.

Sin embargo, el hidrogeno todavía debe superar ciertas barreras para aumentar su producción y que de este modo pueda aumentar su relevancia en la transición energética. Algunas de las limitaciones principales destacadas por IRENA son las siguientes:

La transición energética como un límite al desarrollo en un contexto de globalización e interdependencia

Costo: El costo del hidrógeno limpio, en particular del hidrógeno verde, sigue siendo elevado en relación con los combustibles ricos en carbono. No sólo el costo de producción, sino también los costos de transporte, transformación y almacenamiento son elevados. Adoptar tecnologías de hidrógeno limpio para usos finales puede resultar caro y los procesos de captura y secuestro de carbono aún no se han desplegado a gran escala.

Madurez Tecnológica: Algunas tecnologías de la cadena de valor del hidrógeno necesarias para la descarbonización aún tienen un bajo nivel de preparación tecnológica y deben probarse a escala. Por ejemplo, las turbinas de gas que funcionan exclusivamente con hidrógeno, y en lo que respecta al comercio marítimo, solo hay un prototipo de buque que puede transportarlo (aunque cuando se diseñan escenarios de transporte marítimo a larga distancia se lo suele hacer considerando el transporte de amoníaco y no de hidrógeno puro).

Eficiencia: La producción y conversión de hidrógeno conllevan importantes pérdidas de energía en cada etapa de la cadena de valor, incluyendo la producción, el transporte, la conversión y el uso. Además, la producción de hidrógeno azul es intensiva en energía, lo que aumenta la demanda energética global.

Disponibilidad de energía renovable: En 2050, la producción de hidrógeno con electrolizadores puede consumir cerca de 21.000 TWh, casi tanta electricidad como la que se produce hoy en día en todo el mundo (IRENA,2021-WETO). A medida que se electrifican más sectores de uso final, la falta de electricidad renovable suficiente puede convertirse en un cuello de botella para el hidrógeno verde.

Normas y certificación: Los países carecen de mecanismos institucionalizados para hacer un seguimiento de la producción y el consumo de cualquier tipo de hidrógeno e identificar sus características (por ejemplo, origen y emisiones del ciclo de vida). Además, el hidrógeno no se contabiliza en las estadísticas oficiales de consumo total de energía final y no se reconoce el valor económico de la contribución del hidrógeno limpio a la reducción de emisiones.

El problema del huevo y la gallina: La construcción de la infraestructura necesaria para el hidrógeno plantea el problema del huevo y la gallina. Sin demanda, las inversiones siguen siendo demasiado arriesgadas para una producción a gran escala que podría reducir los costos, pero sin economías de escala la tecnología sigue siendo demasiado costosa.

Es también Van de Graaf quien destaca en el informe de IRENA correspondiente a la temática del hidrogeno, que realizar el cambio hacia una economía verdaderamente sostenible no se trata simplemente de cambiar las fuentes de energía y mantener el sistema energético actual; se deben desarrollar formas más eficientes, justas y equitativas de utilizar la energía. Hacerlo implica reducir el consumo innecesario de energía en muchos usos finales y cambiar el sistema económico actual, que se basa en el consumo continuo creciente.

Las palabras del especialista en hidrógeno están perfectamente alineadas con lo que mencionaba el director de IRENA citado al inicio de esta sección. La transición energética supone un cambio de una magnitud tal que implican una reestructuración del sistema global de

energía. La transición energética actual es antes que nada un llamamiento a repensar que se puede hacer y que ya no podrá hacerse conforme a los nuevos arreglos energéticos.

En el caso puntual del hidrógeno nos encontramos con un vector energético sumamente interesante a la hora de manejar los flujos intermitentes de las generaciones solar y eólica, pero con una serie de limitaciones estructurales de que no pueden ser pasadas por alto. El hidrógeno es el resultado de un proceso de manufactura por lo tanto siempre hay que tener en cuenta el consumo de energía necesario para el mismo. Incluyendo también la energía necesaria para dotarlo de una infraestructura que lo haga viable a escala global tal como plantea la transición energética. El caso del hidrógeno invita a ser analizado en términos de la teoría del EROEI y deja planteado un interrogante que se hace extensivo a todo el proceso sociológico que estamos analizando: ¿Hasta qué punto hay conciencia, a nivel global, del hecho que la matriz energética propuesta por la transición energética actual supone una menor cantidad de energía disponible?

A modo de resumen para esta sección podemos rescatar un artículo publicado por Baxi (compañía dedicada a la provisión de soluciones en sistemas de climatización) en su página web donde se ponen de manifiesto algunas de las ventajas y desventajas vinculadas al hidrógeno como componente fundamental de la transición energética que estamos atravesando:

- Fuente de energía renovable y limpia: Cuando se quema el hidrógeno no se liberan elementos contaminantes a la atmósfera. La reacción que produce el hidrógeno al ponerlo en contacto con el oxígeno- no produce emisiones contaminantes de CO₂, sino agua, por lo que no contamina. No emite gases de efecto invernadero durante la combustión. Es una fuente de energía limpia que solo emite vapor de agua y no deja residuos en el aire.
- No es tóxico: Desde el punto de combustión de calderas, no tiene la peligrosidad del monóxido de carbono. No es tóxico ni corrosivo.
- Eficiente: Tiene un poder calorífico por cada kg de combustible 3 veces superior a la mayoría de las fuentes de combustible de origen fósil, por lo que se necesita menos masa de hidrógeno para realizar las mismas tareas.
- Difícil de almacenar: Uno de los principales hándicaps del hidrógeno es que es un gas muy liviano, que se almacena, distribuye y consume en estado gaseoso, lo que dificulta su almacenamiento y transporte. Además, es un combustible que ocupa mucho espacio, por lo que se necesitan depósitos más grandes y tuberías más gruesas. Es un combustible con una energía específica muy alta (33,33kWh/kg) en comparación con otros gases combustibles como el gas natural (12,39 kWh/kg). En cambio, tiene una densidad mucho más baja que el propio gas natural. Lo que hace que el poder calorífico en volumen del combustible sea inferior. Para obtener la misma energía, el volumen consumido será mayor. Tendremos que transportar y almacenar tres veces más volumen de hidrógeno que de gas natural.
- Elevado costo de producción: Tanto el proceso de reformado con vapor de agua como la electrólisis son procesos caros que impiden a muchos países comprometerse con la producción masiva. Por ejemplo, con el método tradicional de electrólisis, para producir 2,99kWh de energía se tiene que gastar 2.83 kWh de electricidad. Por eso, el hidrógeno

producido por la electrólisis tiene los costos muy elevados porque se necesita mucha electricidad.

- Proceso de producción: Como hemos mencionado anteriormente, este vector energético no es un combustible que se pueda extraer de la naturaleza. Es un tipo de energía que se tiene que fabricar. El hidrógeno puede producirse a partir de un combustible fósil, pero emite CO₂.
- Seguridad: El hidrógeno es una sustancia peligrosa, al igual que el gas natural, es inflamable y volátil.
- Peligrosidad: El hidrógeno es un gas difícil de detectar, es inodoro e incoloro. Pero no deja de ser menos peligroso que el gas natural, gas propano o butano. El hidrógeno es un gas muy liviano, esto hace que en el aire se disperse muy rápidamente. Hay que tener cuidado con los materiales que se utilizan. En volumen, el hidrógeno tendrá una tasa de fuga 3 veces superior a la del gas natural, pero como el poder calorífico en volumen es tres veces inferior, en términos de energía, la tasa de fuga será similar a la del gas natural.

Consideraciones finales del capítulo 1

La comparación entre diversas fuentes de energía primaria, utilizando al EROEI como factor, arroja como resultado valores congruentes a los que se obtienen en el cálculo de la densidad de potencia. Las fuentes fósiles muestran resultados de energía neta considerablemente más elevados que los correspondientes a las energías renovables. Sin embargo, entre las fuentes fósiles predominantes en la matriz energética actual se observan valores declinantes para los yacimientos de hidrocarburos. Los yacimientos no convencionales de petróleo y gas, donde podemos incorporar también a las arenas asfálticas (*tar sands*) y el esquisto bituminoso (*shale oil*), requieren por la naturaleza de su proceso extractivo cantidades considerables de energía lo que implica que su EROEI nunca se encuentre en el mismo orden de magnitud que aquel correspondiente a los recursos convencionales.

La diferencia en los valores de energía neta entre las fuentes de energías tradicionales (de origen fósil) y las renovables con mayor penetración en la matriz energética actual (solar y eólica) tiene varias causas. En primera medida es explicable por el hecho de que las energías de fuente fósil, luego de más de cincuenta años de predominio, cuentan con una capacidad instalada en sistemas de generación, conversión y transporte que en el caso de las energías renovables aún no está desarrollada. En segundo término, la naturaleza misma del proceso de apropiación de los flujos energéticos de los recursos eólicos y solares tiene menor retorno energético, independientemente de las adiciones necesarias en infraestructura que deben realizarse para que los mismos aumenten su penetración en la matriz energética. Una mayor participación de las energías renovables en la matriz actual implicaría necesariamente erogaciones para el desarrollo de infraestructura de las mismas, esto resulta también en un incremento en términos energéticos (la energía necesaria para construir y transportar los paneles fotovoltaicos o la requerida para fabricar, transportar y montar los parques eólicos); por lo tanto, con un mayor input se requerirá, entonces, que el output también lo sea, para evitar valores de energía neta

bajos. Sin embargo, el output de las fuentes renovables no es alto, el costo energético que requiere el desarrollo de infraestructura, la dificultad de transporte de la energía capturada (conexión a la red) y, fundamentalmente, los requerimientos de almacenamiento, dada la intermitencia natural del recurso, hacen mella en la energía de salida.

Volviendo al EROEI, cuando se comparan las distintas fuentes, se destaca el hecho, señalado por Heinberg, de que las sociedades industriales emergieron en el contexto de retornos de energía de dos dígitos (50:1 o más). Así como se hacía énfasis en los cambios necesarios para la estructuración social que implicaría un reemplazo de fuentes energéticas de mayor densidad de potencia por otras de menor densidad, a partir de los trabajos de Hall y Heinberg, se puede concluir que en el contexto de retornos netos sobre la energía cada vez menores a los cuales debe hacer frente la sociedad actual es necesario volver a discutir las nociones predominantes de desarrollo.

En un artículo publicado por la revista de divulgación *American Scientist*, en el número de mayo-junio de 2009, titulado *Revisiting the Limits to Growth After Peak Oil*, Charles Hall y John W. Day Jr., reexaminan algunos de los postulados de los años 70 del siglo XX, en relación con el desarrollo y condensados en la ya citada obra *Limits to Growth* (Meadows, Randers et All, 1972) surgida de los informes al Club de Roma. Hall y Day señalan como la concepción neoclásica de la economía, y de manera ampliada el paradigma de crecimiento continuo de occidente, obvia los límites naturales del crecimiento establecidos por la biofísica. Estos límites surgen de la relación entre recursos disponibles y la demanda de estos, lo que nos pone nuevamente frente al dilema malthusiano (Thomas Malthus propone en el siglo XVIII una tesis en la que sostiene que el crecimiento de la población humana superaría eventualmente la capacidad de producción de alimentos, lo que llevaría a una crisis de subsistencia).

La idea de que algo pueda simplemente ser consumido en su totalidad no tiene lugar en una concepción de la realidad donde el mercado siempre verá en la necesidad insatisfecha una oportunidad de ofertar, la sustitución infinita. Hall entiende que el incremento de recursos con los que satisfacer las necesidades de la población mundial en continuo crecimiento se ha sostenido partir de un incremento en el uso de energía barata (subsidio energético). Si finalizara la disponibilidad de energía de fácil acceso y considerando los menores retornos de energía neta de las fuentes que la habrían de suceder (energías renovables), las posibilidades de una falla sistémica se tornarían inevitables. Hall sostiene que esta posibilidad no está concebida en las políticas de transición y que es también obviada por la comunidad científica en general, que se muestra fundamentalmente centrada en demostrar los efectos adversos del consumo de hidrocarburos. La conclusión para el autor es que se debe de comenzar a teorizar sobre una economía que contenga una perspectiva tanto social como biofísica si de algún modo pretendemos evitar la falla sistémica hacia la cual nos estaríamos conduciendo.

Coincidimos con Hall en la necesidad de introducir a la escasez, o el límite, como una noción inevitable en el debate sobre la transición energética. Pretender que fuentes de energía con menor retorno energético neto, o menor densidad de potencia, ocupen el lugar de otras con valores superiores en estas esferas sin evaluar un cambio en el uso de la energía estaría dejando espacio para escenarios de desequilibrio generalizado en el sistema global de energía,

con las consecuencias negativas que ello podría generar. Cuando nos referimos al uso de la energía, damos cuenta del estilo de vida que no solo que lleva la mayor parte de la sociedad occidental sino también al estilo de vida aspiracional de las incipientes clases medias asiáticas (un argentinismo que utilizamos para definir el mayor acceso a bienes de consumo y servicios que se ha observado en varios países asiáticos a partir de la primera década del siglo XXI) que se encuentra fundamentalmente basado en una imitación del estilo de vida americano. La participación de las fuentes de energía renovables aumenta, pero también aumenta el consumo global de energía. La transición energética ya ha sido planteada, así como los límites intrínsecos que surgen de las fuentes hacia las que se orienta la transición.

Vale la pena en este punto retomar algunas de las conclusiones que plantea Smil en su obra *Power of Density* (2015, MIT Press). Allí sostiene que las condiciones actuales de la tecnología que hacen a la captura, almacenamiento y transporte de los flujos energéticos de origen renovable no permitirían realizar una transición desde un sistema global predominantemente fósil a uno exclusivo de generación renovable. De modo que el paradigma de la descarbonización total del sistema energético, central en la transición energética en estudio, requiere de avances tecnológicos que todavía no se han dado. Si consideramos que las tecnologías propuestas para el nuevo mix energético ya se conocen, podríamos decir que la transición no será disruptiva por lo menos en estos términos, aunque los tiempos planteados para la transición sí parecen fundarse en una expectativa asociada a algún fenómeno de disrupción (una nueva tecnología o un incremento más que proporcional en la eficiencia de las ya conocidas); consideramos que este aspecto da lugar a la planificación de la transición principalmente en términos sociales. La magnitud del cambio que nos planteamos es tan grande que el mismo debe ser apoyado y validado por la ciudadanía. Es una necesidad de primera magnitud para el éxito de la transición que esta sea legítima y no surja como un fenómeno impuesto. Smil considera que hay determinadas acciones que, si bien no implicarían un reemplazo de plano de los combustibles fósiles, sí potenciarían un incremento de las energías renovables en la composición de los usos finales de la energía. Estas se vinculan fundamentalmente al incremento de la electrificación de los usos finales de la energía. El autor entiende que cuanto mayor sea el grado de electrificación que alcance el uso de la energía en la transición energética, cualquiera sea su conformación del mix de generación, esta será más exitosa. En relación con este punto, y más allá de los costos económicos que implicaría un reemplazo a gran escala de convertidores primarios, una mayor descentralización en la generación de energía eléctrica siempre será deseable. Sin embargo, no es posible disociar este punto de dos realidades asociadas al uso final de la energía: desde el año 2007, más de la mitad de la población mundial ha estado viviendo en ciudades. Para el 2050 este porcentaje estará por encima del 70% y más de la mitad de la población lo hará en megaciudades con poblaciones superiores a los 10 millones. Suplir estos consumos energéticos de alta densidad de potencia con sistemas descentralizados de baja densidad no sería posible. Un desacople similar ocurriría con las densidades de potencia requeridas para usos industriales, principalmente con la fundición de metales y la síntesis de elementos químicos necesarias para una producción que abarca un rango de productos que va desde el amoníaco, pasando por plásticos hasta metales compuestos.

Podemos afirmar entonces, que habría una desconexión en términos de densidad de potencia requerida entre los usos finales de la energía que conforman nuestra sociedad actual y la que ofrecería un sistema energético basado en renovables. Hay un conjunto de usos finales de la energía donde la descarbonización resulta muy compleja. Por ende, comenzar a indagar por nuevos usos finales de la energía o una readecuación de los existentes a densidades de potencia y retornos energéticos menores podría ser otra manera de pensar la transición.

De este modo, observamos que la transición actual abre ciertos interrogantes a partir del modo en que está siendo planteada o interpretada por los diversos actores de la sociedad, cuando la analizamos sobre la base de los parámetros citados en el presente capítulo. Volviendo una vez más sobre las experiencias pasadas del hombre en el campo de las transiciones es posible confirmar que una transición energética no es un fenómeno rápido o que se pueda reducir a un par de décadas; la adopción de determinados conversores primarios de energía implica elevadas inversiones en reconversión y eficiencia que, no solo deben considerar la factibilidad técnica para un uso-conversor, sino que también deben tener en cuenta las barreras socioculturales que todo conversor primario debe sortear previamente a su total adopción. Finalmente se encuentran las cuestiones inherentes a la capacidad de aportar de energía por parte de los sistemas de captura renovables mediante los cuales se pretende sustituir la generación de fuente fósil. Como se vio, los sistemas de captura de flujos energéticos fundados en aprovechamientos de energías renovables se caracterizan por sus bajas densidades de potencia y tasas de retorno energético. Las bajas densidades de potencia suponen un desafío para un uso generalizado de la energía, que ha tendido a concentrarse fundamentalmente a partir de las densidades crecientes que aportan los combustibles fósiles y su transporte desde mediados del siglo XIX. En lo que respecta a las tasas de retorno energético insuficientes, se encuentra allí quizás los mayores interrogantes que supone esta transición energética: ¿En qué medida se puede sostener el grado de desarrollo actual con una menor cantidad de energía disponible? Y atendiendo a que el desarrollo se ha dado inequitativamente a lo largo de la historia del hombre es menester preguntarse ¿Hay posibilidades de desarrollo con menor cantidad de energía disponible?

Capítulo 2 Transición Energética – Análisis de la problemática a partir de publicaciones específicas

Como ha sido expresado en el capítulo anterior, esta transición energética tiene su razón de ser en una cuestión ambiental. Ha sido determinado y aceptado, por los actores implicados en el proceso de transición, que es necesario avanzar hacia una matriz energética con menor participación de carbono para evitar un conjunto de consecuencias medioambientales, que suelen englobarse dentro de lo que se denomina calentamiento global. Conforme a esta opinión mayoritaria, el calentamiento global, que puede ser definido como el aumento de la temperatura promedio sobre la superficie del planeta tierra con relación a los niveles de temperaturas preindustriales estimados, conllevaría un conjunto de consecuencias negativas para los diversos ecosistemas terrestres, con su consecuente pérdida de biodiversidad, degradación de los suelos, sequías prolongadas en algunas zonas e inundaciones en otras. En términos generales, se trata de una degradación de las condiciones de habitabilidad del planeta.

De este modo, la transición energética actual debe ser comprendida como respuesta a una problemática ambiental de carácter global. La utilización de combustibles fósiles para la generación de energía ha sido identificada, tal como se verá en detalle durante el análisis de ciertos documentos específicos, como la actividad humana que más contribuye a la emisión de gases de efecto invernadero, entendido este como un fenómeno atmosférico natural fundamental para mantener una temperatura adecuada para la vida en el planeta tierra. Sin embargo, el exceso de gases de efecto invernadero (G.E.I.) y por ende su concentración, que surge de diversas actividades humanas, contribuiría a que potencie el fenómeno y repercuta en un aumento de la temperatura terrestre, con efectos nocivos para el planeta. Aunque mayoritaria, la explicación antes mencionada no es unánime dentro de la comunidad científica internacional.

Considerando tres documentos publicados por distintas entidades pertenecientes al sector energético global intentaremos hacer una descripción del estado del arte y un análisis de este. El primer documento que será analizado es el *WETO 2022 (World Energy Transitions Outlook)* publicado por la Agencia Internacional de Energías Renovables, IRENA (*International Renewable Energy Agency*). Seguidamente se analizará la hoja de ruta *Net Zero by 2050: A Roadmap for the Global Energy Sector* emitido por IEA (*International Energy Agency*) en el 2021. Finalmente, incorporaremos la publicación de Chevron, *Climate change resilience: advancing a lower carbon future (2021)*. A partir del documento de IRENA exploramos tanto las necesidades como las propuestas para la transición, desde un punto de vista fundamentalmente tecnológico, conforme al espíritu del documento en sí mismo y de la agencia emisora. Con el *Net Zero*, de IEA, incorporamos algunos aspectos fundamentalmente políticos, o de índole ciudadana, que se revelan como fundamentales para lograr una transición ordenada. IEA es una entidad creada como una respuesta de occidente a la crisis energética que se desató luego de los embargos petroleros impuestos por los principales productores árabes. Desde su fundación ha estado vinculada a la OCDE (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos) y por lo tanto representa de algún modo la visión de los países miembro (estados en su gran mayoría desarrollados) su aporte sistemático al estudio de la problemática energética convierte en imperativo al análisis del documento en cuestión. La perspectiva de Chevron aporta la visión

empresarial de la transición, partiendo desde el corazón mismo de la industria de la energía, llamada a reinventarse. Chevron se ha destacado en las últimas décadas por la claridad de su estrategia corporativa y habilidad para comunicar la misma. Como destaca la propia compañía en su informe, los estados nacionales se comprometen a realizar reducciones de emisiones, pero son las compañías que operan dentro de sus economías nacionales las que efectivamente las llevan a la práctica.

En las consideraciones finales del capítulo se incluirán algunos comentarios sobre El Pacto Verde Europeo (Comisión Europea, 2019). Si bien este documento no se refiere centralmente a la cuestión de la transición energética, la aborda y ofrece, además, una mirada integral sobre las transiciones y lo que implica para la sociedad, en su conjunto, plantearse un futuro con menor cantidad de emisiones de carbono.

Antes de ingresar al análisis detallado de los documentos seleccionados, consideramos relevante hacer una mención al surgimiento y rol del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, del inglés *Intergovernmental Panel on Climate Change*). En el mismo sentido se hará una breve reseña del Acuerdo de París (2015) y los cambios que este introdujo al Protocolo de Kioto (1997). Es fundamental tener una noción de estos para poder comprender el estado actual de la presente transición energética.

El IPCC fue creado por la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) en 1988. De acuerdo con sus declaraciones en el sitio web, el IPCC intenta “ofrecer al mundo una visión científica clara del estado actual de los conocimientos sobre el cambio climático y sus posibles repercusiones medioambientales y socioeconómicas”. Entre las actividades principales de este grupo se incluye el asesoramiento técnico a las partes de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), cuyos miembros se reúnen, periódicamente, en lo que se conoce como Conferencia de las Partes (COP). La importancia de este órgano de las Naciones Unidas y sus respectivas conferencias radica en el carácter eminentemente político de estas. Cuando los Estados miembro se comprometen a adoptar determinadas medidas, como limitar las emisiones de CO₂ o favorecer la producción de vehículos eléctricos mediante la reducción de impuestos o tasas, están realizando expresiones de sentido político. Es importante comprender el entramado multilateral en el que se inscriben estas usinas de pensamiento para tener una idea acabada de la transición energética que estamos atravesando y así poder sopesar el conjunto de concepciones sobre las que se sustenta, en función del paradigma de desarrollo sustentable, que se inscribe, en última instancia, dentro de la noción superior de desarrollo humano cuya plenitud se alcanza tanto en el ámbito individual como a nivel comunitario.

Como fruto de la Conferencia de Partes (COP21), llevada a cabo en París durante el 2015, se redactó el Acuerdo de París, un tratado internacional destinado a abordar el cambio climático y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. El acuerdo se abrió a la firma el 22 de abril de 2016 y entró en vigor el 4 de noviembre del mismo año, después de ser ratificado por noventa y siete países. Su objetivo principal es mantener el aumento de la temperatura media global muy por debajo de 2 grados Celsius con respecto a los niveles preindustriales, y realizar esfuerzos para limitar el aumento de la temperatura a 1.5 grados Celsius. Los prospectos,

programas y planes para llevar adelante la transición energética actual, ya sea que fueron publicados por agencias constituidas por estados nacionales o incluso por compañías de capital privado, se encuentran invariablemente influidas por el objetivo del Acuerdo de París. Aunque no se puede hablar de un reemplazo directo, es importante que tengamos en cuenta que este acuerdo puede considerarse como una evolución del Protocolo de Kioto (formalmente un anexo del CMNUCC de 1997). Hasta la adopción del acuerdo de París, el protocolo de Kioto era el acuerdo que trazaba las líneas fundamentales para las cuestiones vinculadas al cambio climático. Este documento se centraba en la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero de los países desarrollados, y estableció metas y objetivos vinculantes para ellos durante el período 2008-2012. Las principales diferencias entre ambos documentos podrían resumirse de la siguiente manera:

1. Participación universal: mientras que el Protocolo de Kioto sólo requería compromisos de reducción de emisiones de los países desarrollados, el Acuerdo de París busca la participación del mayor número de estados posible. Reconoce que el cambio climático es un desafío global que requiere esfuerzos de todos los países, independientemente de su nivel de desarrollo.
2. Enfoque basado en contribuciones nacionales: en lugar de imponer metas y objetivos específicos a cada país, el Acuerdo de París establece un enfoque basado en Contribuciones Determinadas a Nivel Nacional (NCD, del inglés *Nationally determined contributions*). Los países presentan sus propias metas y planes de acción voluntarios para reducir las emisiones y limitar los efectos ambientales vinculados al cambio climático, lo que les da flexibilidad para establecer objetivos adecuados a sus circunstancias nacionales.
3. Objetivo de temperatura más ambicioso: mientras que el Protocolo de Kioto buscaba limitar el aumento de la temperatura global a menos de 2 grados Celsius, el Acuerdo de París establece el objetivo más ambicioso de limitar el aumento a 1.5 grados Celsius. Esto refleja una mayor preocupación por los impactos del cambio climático y la necesidad de acciones más rápidas y enérgicas.
4. Proceso de revisión y mejora periódica: el Acuerdo de París establece un proceso de revisión y mejora periódica en el que los países deben revisar y fortalecer sus compromisos de reducción de emisiones cada cinco años. Esto busca aumentar la ambición colectiva con el tiempo y garantizar una respuesta efectiva al cambio climático.

Primer documento: World Energy Transitions Outlook (WETO) de IRENA (International Renewable Energy Agency) - 2022

IRENA es una agencia internacional, a la fecha, constituida por ciento sesenta y ocho estados miembros y dieciséis más en proceso de adhesión. En el 2010 entró en vigor su estatuto y en abril de 2011 la comisión preparatoria fue disuelta dando lugar al inicio de su actividad oficial. Si bien IRENA se establece formalmente en la segunda década del siglo XXI, sus orígenes se remontan a 1981 cuando, en el marco de la conferencia de Naciones Unidas para las nuevas energías y las energías renovables desarrollada en Nairobi, Kenia, se propuso crear una agencia internacional dedicada a la energía renovable. El dato histórico, obtenido del sitio web de la agencia, da cuenta de la perspectiva con la que las energías renovables son estudiadas, fue durante la década de 1980, que la cuestión climática y su relación con accionar humano comenzó a ganar masividad.

La importancia del informe de IRENA que hemos seleccionado radica en la inclusión de las llamadas avenidas tecnológicas. Se trata de seis paquetes de políticas con un anclaje en la adopción, o implementación a escala, de ciertas tecnologías que de ser transitadas permitirían el logro del objetivo central que motoriza la presente transición energética de acuerdo con IRENA: limitar el aumento de la temperatura media global para fines del presente siglo a 1,5°C, en relación con los niveles preindustriales. El cambio climático como resultado del accionar humano, fundamentalmente a partir de la liberación de carbono a la atmósfera, debido al uso de combustibles fósiles y la producción de hidrocarburos, es una noción central para explicar la necesidad de la presente transición energética. Es esta noción, como ya hemos mencionado en párrafos anteriores la que cuenta con el mayor aval de la comunidad científica internacional. Las principales agencias internacionales y organismos multilaterales de relevancia mundial, entre los que se encuentra IRENA, entienden esta transición como un conjunto de acciones necesarias para descarbonizar el sector energético y así evitar una serie de acontecimientos climáticos, entre los que sobresale el calentamiento de la superficie de la tierra, comúnmente denominado calentamiento global.

La elección del WETO 2022 de IRENA, como uno de los documentos de base para esta tesis, se basa, en parte, por la claridad conceptual con la que la agencia define la transición energética, fundamentalmente en términos tecnológicos. IRENA entiende que esta transición es un camino hacia la transformación del sector global de energía basado en combustibles fósiles a uno de carbono cero para la segunda mitad del siglo XXI. En el centro, identifica la necesidad de reducir las emisiones de CO₂ relacionadas con la energía para limitar el cambio climático. Se sostiene que la descarbonización del sector energético requiere acción urgente a escala global, y aunque la transición ya está en marcha, remarca que se necesitan más acciones para reducir las emisiones de carbono y mitigar los efectos del cambio climático. IRENA establece que con medidas que favorezcan el uso de la energía renovable, y por ende la eficiencia energética, se podrían alcanzar, potencialmente, el 90% de las reducciones de carbono requeridas. Conforme a la organización que estamos analizando, la transición energética se basará en la tecnología de la información, tecnología inteligente, marcos políticos e instrumentos de mercado.

El WETO 2022, publicado en un año particularmente agitado para el sector energético a nivel global, a partir de las implicancias que tuvo la invasión de la Federación de Rusia a Ucrania en el precio de los hidrocarburos y los temores que se suscitaron con respecto a la seguridad energética europea, comienza con un reconocimiento, en el prefacio realizado por su director general, Francesco La Camera, de los desafíos que supone, para la sociedad postindustrial globalizada, una crisis energética de la magnitud de la actual, su relación con el cambio climático, que se destaca como la razón de ser de la transición energética y la potencialidad de las energías renovables, no solo como medio para evitar que el clima cambie sino también como garantes del crecimiento y la inclusión, por ende del desarrollo en sí:

“(…) Muchos aspectos de la vida cotidiana sienten las repercusiones de la agitación en el sector energético. En ausencia de alternativas, los altos precios de los combustibles fósiles infligen pobreza energética y pérdida de competitividad industrial, mientras que los ciudadanos de todo el mundo se preocupan por sus facturas de energía y los impactos climáticos, como advierte el reciente informe del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático” (...)⁶

(…) Hemos visto una y otra vez que la energía que no es confiable genera incertidumbre; la energía demasiado costosa enajena y aísla; y la energía que contamina incapacita y mata. En todos los casos, las malas elecciones energéticas significan un crecimiento económico más lento y un daño potencialmente irreparable a los ecosistemas que nos sustentan a todos. Las tecnologías renovables, eficientes y descentralizadas, por el contrario, pueden crear un sistema menos propenso a los shocks del mercado y mejorar la resiliencia y la seguridad energética a través de la diversidad de opciones de suministro y actores. La misma resiliencia se puede integrar en el mercado global del hidrógeno en evolución, que requiere inversión en los próximos años para alejarse del gas fósil y construir la infraestructura necesaria a largo plazo. (...)⁷

⁶ Many aspects of everyday life feel the repercussions from turmoil in the energy sector. In the absence of alternatives, high fossil fuel prices inflict energy poverty and loss of industrial competitiveness, while citizens worldwide worry about their energy bills and climate impacts as warned by the recent report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Pág.4 IRENA (2022), World Energy Transitions Outlook 2022: 1.5°C Pathway, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi

⁷ We have seen time and again that energy that is unreliable causes uncertainty; energy that is too costly alienates and isolates; and energy that pollutes incapacitates and kills. In all cases, poor energy choices mean slower economic growth and potentially irreparable damage to the ecosystems that sustain us all. Efficient and decentralized renewable technologies, by contrast, can create a system less prone to market shocks and improve resilience and energy security

La transición energética como un límite al desarrollo en un contexto de globalización e interdependencia

*(...) Las perspectivas posicionan a la eficiencia y la electrificación como impulsores principales, habilitados por la energía renovable, el hidrógeno verde y la bioenergía moderna sostenible. El WETO también muestra que, con un marco político holístico, inversión y cooperación serias, la transición energética puede ser un medio para la creación de empleo, una economía inclusiva y un mundo más igualitario (...)*⁸

*(...) Una transición energética basada en energías renovables es la vía más realista para evitar los peores efectos del cambio climático. Y esa misma vía promete una mayor seguridad energética, resiliencia nacional y una economía global más inclusiva, equitativa y resistente al cambio climático.” (WETO 2022, IRENA – traducción propia.)*⁹

Si se analiza la cita, pueden notarse los ejes centrales de la definición de transición energética esgrimida por la organización: cambio climático, descarbonización del sector energético y energías renovables. De allí, surge, también, un conjunto de externalidades positivas que se desprenden de la aplicación práctica de los principios mencionados con anterioridad, dando lugar a un concepto que se denominada como “economía de la transición” (WETO 2022). La economía de la transición sintetiza el conjunto de flujos materiales, financieros y también energéticos a partir de los cuales la descarbonización de la energía se transformaría en una realidad. De acuerdo con otro informe publicado por IEA, el *World Energy Outlook 2021* o “El panorama para la energía mundial para 2021”:

“Una nueva economía global de la energía está emergiendo ... En el año 2020, incluso cuando las economías se doblegaron bajo el peso de los bloqueos de Covid-19, las fuentes de energía renovables, como la eólica y la solar fotovoltaica, continuaron creciendo rápidamente, y los

through the diversity of supply options and actors. The same resilience can be embedded in the evolving global hydrogen market, which requires investment in the coming years to move away from fossil gas and build up the infrastructure needed for the long term. Pág.4 IRENA (2022), *World Energy Transitions Outlook 2022: 1.5°C Pathway*, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi

⁸ The Outlook positions efficiency and electrification as primary drivers, enabled by renewable power, green hydrogen, and sustainable modern bioenergy. WETO also shows that, with a holistic policy framework, serious investment and co-operation, the energy transition can be a means for job creation, an inclusive economy and a more equal world. Pág.4 IRENA (2022), *World Energy Transitions Outlook 2022: 1.5°C Pathway*, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi

⁹ A renewables-based energy transition is the most realistic avenue to avoid the worst effects of climate change. And that same avenue promises greater energy security, national resilience, and a more inclusive, equitable and climate-proof global economy. Pág.5 IRENA (2022), *World Energy Transitions Outlook 2022: 1.5°C Pathway*, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi

vehículos eléctricos establecieron récords de ventas. La nueva economía energética será más electrificada, eficiente, interconectada y limpia. Su surgimiento es el producto de un círculo virtuoso de acción política e innovación tecnológica, y su impulso ahora se sustenta en costos más bajos. En la mayoría de los mercados, la energía solar fotovoltaica o eólica representa ahora la fuente disponible más barata de nueva generación de electricidad. La tecnología de energía limpia se está convirtiendo en una nueva área importante para la inversión y el empleo, y en un escenario dinámico para la colaboración y competencia internacional.” (World Energy Outlook 2021, International Energy Agency) Pág. 15. ¹⁰

En lo que respecta a la economía de la transición, tomada de la publicación de la Agencia Internacional de Energía, así como también del conjunto de principios esgrimidos en el prefacio del WETO 2022 de IRENA, y al surgimiento del circuito económico positivo que se desprendería de la transición energética, es importante remarcar que las bases de esto aún descansan en un conjunto de tecnologías o bien no probadas a nivel de escala (hidrógeno como vector o combustible por solo citar una) o aún no desarrolladas en el terreno de la aplicación comercial (captura y secuestro de carbono). Es en este punto en donde la cuestión de la transición y su vínculo con el desarrollo se torna un problema de optimización. Asumiendo la existencia de recursos, tanto financieros, como materiales, finitos ¿cuánto de esto debe ser destinado a la economía de la energía y cuánto debe permanecer alimentando las estructuras energético-productivas tradicionales? Este interrogante tiene una respuesta clara y concreta dentro del conjunto de organizaciones multilaterales que, hoy por hoy, dictan los pasos a seguir para la transición energética y han sido seleccionadas para este trabajo, como son el propio WETO bajo análisis y también el documento Net Zero by 2050 de IEA que analizaremos en la siguiente sección de este capítulo; se propone el pronto abandono de toda inversión en nueva capacidad energética vinculada a hidrocarburos líquidos y sólidos, conjuntamente con un número elevado de intervenciones estatales destinados a limitar cualquier intento de aprovechamiento fósil; por el contrario se incita a la promoción y el otorgamiento de beneficios diversos para la generación de fuentes renovables, *so pena* de no alcanzar las metas ambientales que se encuentran en el centro de la transición. Esta respuesta tiene un impacto en el proceso de desarrollo y crecimiento que debe ser evaluada considerando las características técnicas de las fuentes de generación

¹⁰ A new global energy economy is emerging... In 2020, even while economies bent under the weight of Covid-19 lockdowns, renewable sources of energy such as wind and solar PV continued to grow rapidly, and electric vehicles set new sales records. The new energy economy will be more electrified, efficient, interconnected and clean. Its emergence is the product of a virtuous circle of policy action and technology innovation, and its momentum is now sustained by lower costs. In most markets, solar PV or wind now represents the cheapest available source of new electricity generation. Clean energy technology is becoming a major new area for investment and employment – and a dynamic arena for international collaboration and competition. Pág.15 IEA (2021), World Energy Outlook 2021, International Energy Agency.

impulsadas en las propuestas actuales, sus requerimientos estructurales y patrones de conducta, no solo de los oferentes sino también de los usuarios finales de la energía.

Como ya ha sido mencionado, en el centro de la propuesta de IRENA, para la transición energética, se encuentra el objetivo de limitar el aumento de la temperatura media global para fines del presente siglo a 1,5°C, en relación con los niveles preindustriales, un objetivo que se alinea con propuestos por los diversos informes emitidos por el IPCC. Para lograrlo IRENA propone transitar por las seis avenidas tecnológicas, que se analizarán a continuación, considerando fundamentalmente los factores técnicos ya desarrollados en el capítulo anterior: densidad de potencia y tasas netas de retorno energético (EROEI).

A fines de profundizar en las avenidas tecnológicas, planteadas en el documento como objetivos para lograr una transición energética hacia un sector fuertemente descarbonizado, procederemos con su descripción para luego mencionar algunas de las políticas recomendadas en el informe como acciones necesarias para dar cumplimiento a las avenidas tecnológicas. En el presente trabajo mencionaremos, sin hacer una enumeración taxativa, aquellas políticas de implementación, integración o desarrollo de la avenida tecnológica que tienen una orientación hacia medidas más concretas a fines de permitir un análisis más acotado.

1) Aumentar la generación eléctrica basada en energías renovables.

Como ha sido señalado en el capítulo anterior, el aspecto definitorio de las transiciones energéticas se basa en el reemplazo de una fuente de energía por otra en la matriz energética con el consecuente emplazamiento, en la mayoría de los casos, de nuevo un convertidor primario. La primera de las avenidas tecnológicas que plantea IRENA plantea ambas cuestiones.

De acuerdo con el WETO 2022, la generación eléctrica deberá expandirse de 26.900 TWh en 2019 a más de 42.100 TWh para 2030, con el 65% del suministro eléctrico total, en 2030, procedente de fuentes renovables, frente al 26% en 2019. En el año 2050 (determinado por el IPCC como punto de referencia, dado que conforme a sus estimaciones para este periodo todas las metas recomendadas deben haber sido cumplimentadas para evitar un colapso climático) la participación de las energías renovables en la generación de electricidad debe ser del 90%.

Entre las políticas recomendadas para lograr el objetivo planteado por la primera avenida tecnológica se destacan aquellas que dan cuenta de acciones necesarias para desarrollar tecnologías vinculadas al aumento de la generación eléctrica, basada en energías renovables, y la integración de estas a las estructuras existentes (fundamentalmente mercados y redes de distribución y transporte):

- a. Establecer cupos obligatorios de energía renovable, junto con certificados negociables de acuerdo con los arreglos jurisdiccionales pertenecientes a cada estado. En la medida que esta política se globalice y se generen ámbitos regulatorios comunes se facilitará la creación de un mercado internacional basado en la generación de energía renovable.

- b. Implementar estrategias para la adquisición de energía eléctrica estructuradas como *feed in tariff*, primas sobre el precio y subastas.
- c. Producir regulación e instrumentos de precio para pequeños proyectos (por oposición a proyectos de utilidad pública) como puede ser la medición neta de generación.
- d. Contemplar la creación de disposiciones legales y políticas para la conexión a la red de pequeños proyectos, así como la creación de pequeñas redes.
- e. Establecer objetivos específicos por tecnología (*feed in tariff* o subastas) para aquellas menos maduras.
- f. Implementar estructuras organizativas del sector eléctrico adecuadas para altas proporciones de energía renovable variable, contemplando la actualización de los códigos de red para grandes porcentajes de energía renovable variable y un esquema de planificación centralizada, que contemple disposiciones de ventanilla única para la concesión de licencias y apoyo financiero para redes flexibles y aprovechamientos de bombeo hidroeléctrico.
- g. Respalda con incentivos financieros como subsidios para medidores inteligentes, baterías y otras tecnologías de almacenamiento.
- h. Generar sets de políticas y medidas para la gestión del ciclo de vida de los equipos.

Estas políticas podrían clasificarse en tres grandes grupos. En primer lugar, están las medidas relacionadas con aspectos legales o regulatorios y los incentivos financieros: esto incluye los cupos obligatorios de energía renovable y los certificados negociables, que establecen metas claras y obligatorias para la generación de electricidad a partir de energía renovable, así como la posibilidad de comercializar los certificados para cumplir con dichos cupos. Además, estrategias como los *feed-in tariffs*, las primas sobre el precio y las subastas ayudarían a fomentar la adquisición de energía eléctrica de fuentes renovables y establecer precios competitivos para impulsar su desarrollo. Un segundo grupo de acciones se enfoca en la infraestructura y la planificación del sistema energético, lo que implica actualizar los códigos de red para acomodar grandes porcentajes de energía renovable variable, así como la creación de estructuras organizativas adecuadas que permitan gestionar eficientemente una alta proporción de energía renovable en el sector eléctrico. Asimismo, la conexión a la red de pequeños proyectos y la creación de pequeñas redes requieren disposiciones legales y políticas específicas. Por último, la gestión del ciclo de vida de los equipos y el fomento de tecnologías de almacenamiento, son también aspectos importantes dentro del conjunto de acciones seleccionado. Para ello, se sugieren políticas y medidas que promuevan la gestión adecuada de los equipos utilizados en la generación de energía renovable y la implementación de tecnologías de almacenamiento, como medidores inteligentes, baterías y otros dispositivos. Además, la planificación centralizada, la ventanilla única para la concesión de licencias y el apoyo financiero son señalados como necesarios para el desarrollo de redes flexibles y el aprovechamiento de bombeo hidroeléctrico allí donde su utilización fuese funcional.

Estas recomendaciones, a su vez, se destacan por dos aspectos: la intervención estatal como garante del recupero de la inversión de los generadores (*feed in tariff*, cupos, subastas e incentivos financieros) y el rol predominante de la oferta por sobre el de la demanda de energía.

En lo que refiere a cuestiones técnicas vinculadas con aumentos significativos en la generación y usos directos de electricidad basada en energías renovables, estas implican realizar modificaciones estructurales a los sistemas eléctricos para incorporar cantidades considerables (teniendo en cuenta los objetivos planteados) de generación procedente de flujos variables. La primera avenida tecnológica planteada requiere una nueva concepción para el almacenamiento de la energía. Si bien existen cientos de prospectos al respecto, a la fecha no hay alternativas tecnológicas comerciales y/o a escala suficiente para sostener los órdenes de magnitud planteados por IRENA. La solución planteada en el WETO 2022 tiene reminiscencias al factor residual de crecimiento esbozado por algunos economistas hacia mediados del Siglo XX. En dicho siglo, cobraron fuerza los trabajos de un grupo de economistas entre los que se destaca Robert M. Solow, premio Nobel de economía en 1987, quienes sostenían que, a largo plazo, el desarrollo tecnológico es el vector fundamental del crecimiento económico.

Una piedra angular de esta corriente, que en gran medida aún tiene vigencia para aquellos que estudian el crecimiento, es un estudio empírico de Solow titulado "*Technical Change and Aggregate Production Function*" (1957), en donde se consigna que es el cambio tecnológico lo que explica más del 80% del incremento de la producción para la serie estudiada 1909-1949, la que, a su vez, reportó un crecimiento promedio del 1.5% por año dentro de estas cuatro décadas. La explicación de la función de producción y, por ende, del crecimiento económico tuvo un fuerte impacto en la inversión destinada a ciencia, tecnología, investigación y desarrollo, vinculándose ésta, en cierto punto, con los posteriores progresos en la carrera aeroespacial por parte de los Estados Unidos de América. Factor residual se refiere a aquella parte del crecimiento económico que no puede ser asignable a la formación de capital, o sea a la tecnología que no tiene un correlato físico.

La relación entre los postulados sobre el crecimiento, de Solow, y las propuestas de IRENA viene dada por el énfasis que se pone desde el organismo en la inversión destinada a la investigación y el desarrollo como medio para resolver las limitaciones inherentes a las tecnologías propuestas. Así como el factor residual, que se englobaba en el desarrollo tecnológico, permitía a Solow explicar una porción muy grande del crecimiento a partir de técnicas que no se podían constatar en el plano material, IRENA pareciera recurrir al mismo principio cuando aboga por un sistema energético que considerando el estado actual de la tecnología disponible no logra, en términos de energía entregada, superar al anterior. La organización propone un relato en donde las limitaciones presentes de la propuesta, basada en energías renovables, se superarán, en un futuro próximo, a partir de la inversión intensiva. Vale la pena recordar que las teorías de Solow no consideraban el aporte energético fenomenal de los hidrocarburos líquidos, durante ese mismo periodo, en la disponibilidad energética de la economía norteamericana.

En relación con esto, IRENA indica que el ritmo de inversiones para dar con los aumentos requeridos en la generación y uso directo de electricidad, basada en energías renovables, debe pasar de los \$275 billones de dólares anuales, que se invirtieron en promedio entre 2017 y 2019, a \$648 billones de dólares anuales entre 2021 y 2030, y \$775 entre 2031 y 2050, en el terreno de redes de energía y capacidad flexible. En lo que hace capacidad de generación de energía renovable, la inversión debe aumentar desde los \$253 billones de dólares anuales, del período

2017-2019, a \$1.045 billones de dólares anuales, entre 2021 y 2030, para llegar hasta los \$897 billones de dólares anuales, entre 2031 y 2050. Para tener una referencia el Producto Bruto Interno de la República Argentina en el año 2021 de acuerdo con el Banco Mundial fue de \$491.49 billones de dólares.

2) Ampliar la participación de las energías renovables en los usos finales de la energía.

Esta avenida tecnológica se plantea en línea directa con la primera. La cosmovisión de IRENA para la transición energética no solo entiende necesario un movimiento hacia la electrificación de los usos finales de la energía, sino que también sostiene necesario aumentar la participación de la directa de las energías renovables en los usos finales de la energía. Ambas avenidas presuponen condiciones de desarrollo que no se verifican en forma extendida alrededor del mundo.

La segunda de las propuestas analizadas tiene como *key performance indicator* aumentar la participación de las energías renovables en el consumo total de energía final del 19% en 2019 al 38% en 2030. El aumento mencionado sería el necesario para arribar al escenario objetivo de 1,5°C para 2050. Las políticas que se recomiendan para la segunda avenida tecnológica apuntan al uso de energías renovables en transporte, edificios e industria, con un fuerte anclaje en bioenergía (biomasa sólida, biogás, biometano y biocombustibles líquidos) y en la energía solar térmica. El cuerpo de medidas planteado propone acciones que combinan el desarrollo de estructuras que sostengan la utilización directa de renovables en usos finales, con políticas más bien vinculadas a la cuestión de desarrollo urbanístico que favorezcan el uso de renovables en sistemas integrados de calefacción urbana.

Vale la pena aclarar que la calefacción urbana, también conocida como *district heating* en inglés, es un sistema en el cual el calor, generado en un lugar centralizado, se distribuye a través de conductos y tuberías para satisfacer las necesidades de calefacción de edificios residenciales y comerciales. En este sistema, una fuente central, como una planta de energía o una planta de cogeneración, produce calor que luego se distribuye a través de una red de tuberías a diferentes edificios en un área geográfica específica. Esto permite aprovechar de manera eficiente el calor residual de la generación de energía y reducir el consumo de combustibles fósiles en comparación con sistemas de calefacción individuales.

Tanto la biomasa, a través de su uso como combustible, la energía solar térmica y la energía geotérmica son las fuentes renovables que, considerando el estado actual de la tecnología, presentan mayores ventajas relativas con respecto a otras fuentes renovables para ampliar su participación en usos finales de energía, tal como se plantea la propuesta de IRENA.

En términos de inversión financiera, el WETO consigna que la inversión promedio anual en uso directo de energías renovables ha estado, hasta 2019, en niveles históricos de 33 billones de dólares por año; para 2030 se espera que el monto aumente a los 284 billones dólares por años, para finalmente decrecer y estabilizarse en el 2050 alrededor de los 115 billones de dólares por año en promedio.

La transición energética como un límite al desarrollo en un contexto de globalización e interdependencia

- a. Disponer medidas regulatorias que favorezcan el desarrollo de un mercado para las energías renovables (en el marco de los usos finales de la energía), se podrían instrumentar a partir del establecimiento objetivos y mandatos de utilización de calentadores solares de agua, así como incentivos fiscales y financieros (por ejemplo, subsidios o préstamos adaptados).
- b. Fomentar la financiación pública para I+D (Investigación y Desarrollo) y proyectos piloto de apoyo al desarrollo de la tecnología.
- c. Trabajar en la adaptación de los marcos regulatorios correspondientes, para asegurar un uso sustentable de la bioenergía, incluido el establecimiento de objetivos de bioenergía basados en la sostenibilidad y una mejor coordinación intersectorial, regulaciones y esquemas de certificación.
- d. Apoyo para el desarrollo acelerado y la comercialización de tecnologías bioenergéticas avanzadas para usos finales (por ejemplo, biomasa para industrias y *biojet*).
- e. Otorgar incentivos para el desarrollo de cadenas de suministro de bioenergía.
- f. Establecer la obligatoriedad de conexión a sistemas distritales de calefacción y refrigeración alimentados con energías renovables para nuevas construcciones y edificios públicos.

La segunda de las avenidas tecnológicas pone mayor énfasis en el rol de la oferta que en el de la demanda, dentro de lo que sería una nueva estructura energética dominada fundamentalmente por energías renovables. No se espera un consumidor o usuario final de energía con un rol activo, que demande fuentes de baja emisión, sino que se espera el uso de energías renovables, ya sea porque así lo establece la regulación o bien por una limitación de la oferta que lo lleva en esta dirección. Los mecanismos y políticas planteados tienden a mostrar siempre mayor plasticidad para trabajar con la oferta. Ya sea subsidiando o regulando para crear mercados.

Este planteo da lugar a ciertos interrogantes con respecto al modo en que la transición energética está siendo tratada. Fundamentalmente, nos preguntamos ¿se trabaja con la oferta de energía porque a los consumidores les resulta indiferente el origen de esta? Este punto nos lleva a la cuestión de la legitimidad de la transición sobre la que trabajaremos con mayor detenimiento cuando se analicen otros documentos.

En el contexto de la segunda avenida tecnológica, el Estado vuelve a asumir un papel importante como generador de mercados. Esto se traduce en propuestas donde se observa que los gobiernos podrían intervenir, y deberían fomentar activamente la adopción de tecnologías específicas, ya sea mediante la creación de regulaciones favorables, otorgando subsidios o incentivos fiscales, o incluso liderando iniciativas de investigación y desarrollo. Hay un dejo dirigista, *top to the bottom*, en todo el WETO y su planteo de la transición energética.

En lo que respecta a las especificaciones técnicas de las fuentes bioenergéticas se destacan las bajas tasas de retorno energético y la baja densidad de potencia asociada a los cultivos energéticos. Por estas razones, es llamativo el énfasis puesto en la promoción de éstas como fuentes para aumentar la participación de las energías renovables en el consumo total de energía final, sin mencionar, a su vez la dificultad de escalabilidad que las bioenergías

representan, dado que, en última instancia, la competencia por tierras productivas frente a otros usos siempre está presente. En términos de sustentabilidad, las posturas más cercanas a la línea conservacionista han planteado históricamente una posición cautelosa y prudente hacia la adopción de tecnologías o prácticas que implican el uso de recursos naturales para generar energía. Estos grupos, son representados por los postulados históricos planteados en la ya citada obra *The Limits To Growth (1972)* de Meadows, Meadows, Randers y Behrens, tienden a ser más escépticos sobre la posibilidad de generar energía a partir de recursos que se pueden destinar a la alimentación.

La referencia a la paradoja de Jevons, planteada en el siglo XIX, es un elemento clave en este contexto. William Stanley Jevons, un economista británico, analizó el uso del carbón vegetal (bioenergía tradicional) en la revolución industrial. Descubrió que, contrariamente a lo que podría esperarse, el aumento de la eficiencia en el uso del carbón no condujo a una disminución de su consumo, sino todo lo contrario. A medida que la eficiencia mejoraba y se utilizaba menos carbón para una misma cantidad de trabajo, su uso se expandía en otras industrias y aplicaciones, lo que llevaba a un aumento neto del consumo total.

La paradoja de Jevons plantea un desafío para las bioenergías, ya que sugiere que, incluso si se mejoran la eficiencia y la sostenibilidad de los cultivos energéticos, podría no ser suficiente para garantizar una reducción significativa en el consumo global de recursos naturales. Es decir, una mayor eficiencia en la explotación de cultivos energéticos podría llevar a una mayor expansión y demanda de estos recursos, lo que podría resultar en una operación no sustentable a largo plazo. La sostenibilidad y los posibles riesgos ambientales y sociales asociados con estas operaciones.

Distinto es el caso de la energía solar térmica, la tecnología para la captura de flujos energéticos cuenta con rendimientos netos de energía y densidad de potencia superiores a la media de las renovables (especialmente cuando se la utiliza en edificios, como señala Smil, tomando el caso de Alemania). Se trata de una tecnología madura, confiable y de buena relación costo-energía en lugares con buen recurso solar. Su mayor limitación, a la hora de ganar espacio entre los usos finales de la energía, está dada por las dificultades que presenta esta tecnología para alcanzar temperaturas de calentamiento necesarias para la operación industrial energético-intensiva, relegándola al uso residencial.

3) Acelerar la tasa de mejora en la conservación y eficiencia energética.

Para dar cumplimiento a la tercera de las avenidas tecnológicas, la inversión anual promedio destinada a mejorar la intensidad energética debe multiplicarse por 9 para el 2030, lo que implica una disminución del 5% en el total de energía final consumida (TEFC) en 2030 en comparación con los niveles del 2019. Se trata de una propuesta que intenta apuntalar la eficiencia en el uso de la energía con respecto a la producción de bienes y servicios.

La transición energética como un límite al desarrollo en un contexto de globalización e interdependencia

La tasa de mejora en intensidad energética deberá incrementarse a un ritmo anual del 3.1%. Debe considerarse que, según el WETO 2022, utilizando información publicada por IEA, la tasa de mejora en intensidad energética promedió el 1.2% entre 2018-2020. IRENA define intensidad energética como la relación entre el consumo primario de energía y el producto bruto interno. A su vez, la mejora en la intensidad energética, o eficiencia energética, se expresa como el cambio interanual en el componente de intensidad energética del PBI medido en términos de paridad de poder adquisitivo.

La tercera de las avenidas tecnológicas es la que pone mayores expectativas en ciertos aspectos de la demanda de energía como un factor para lograr el objetivo climático, que, como hemos dicho, se encuentra en el centro de la transición actual de acuerdo con IRENA.

Las medidas y políticas que la componen apuntan a promover el consumo de electrodomésticos eficientes; eficiencia energética en transporte, industria y construcción; disminución de pérdidas en transporte y distribución:

- a. Establecimiento de normas de eficiencia para aparatos de consumo eléctrico que apunten al consumo mínimo.
- b. Determinación de estándares de eficiencia para combustible vehicular y normativas para vehículos eléctricos.
- c. Políticas de apoyo y medidas para reducir la demanda de viajes/transporte (por ejemplo, del trabajo a la casa)
- d. Regulares normas mínimas obligatorias para el sector industrial sobre eficiencia energética y/o intensidad de carbono de combustibles, procesos y productos.
- e. Promocionar prácticas de economía circular (reciclado de materiales, gestión de residuos, mejoras en la eficiencia de los materiales y cambios estructurales como la reutilización y el reciclaje).
- f. Adopción de códigos y estándares de construcción con eficiencia energética donde se incluyen sistemas de calefacción, refrigeración e iluminación.
- g. Realización de inversiones en I+D en superredes para fomentar la transmisión y distribución regional.

Entre las medidas ya existentes, pueden citarse las mejoras en los estándares de eficiencia de los aparatos utilizados en el consumo final, la regulación de especificaciones en combustibles tradicionales, y el apoyo a la reducción en la demanda de transporte. Los buenos resultados de estas prácticas han permitido cierto alivio a la demanda de energía. La regulación para industria de la construcción, cuando se trata de nuevas edificaciones, es también una medida plausible de ser adoptada en países con realidades socioeconómicas disímiles, aunque vale la pena agregar que siempre será más sencillo en los Estados con mayores recursos. En este último caso debe atenderse el aumento en los costos que la obligación de conexión a sistemas de generación renovable podría implicar, y en función de esto la voluntad política del regulador según la geografía. Específicamente, cuando hablamos de la necesidad de vivienda, puede que la construcción conforme a los estándares planteados en la agenda energética no garantice un

mayor acceso a este derecho universal dado su mayor costo. Está situación ejemplificada a través de las políticas recomendadas para la construcción de nuevos edificios ilustra, en cierto modo, el debate moral alrededor de la transición energética que se está sucediendo.

De las avenidas tecnológicas hasta aquí planteadas, y de las que restan por describir, se desprende la idea de que es posible mantener un nivel general de actividad similar al actual, solo habría un cambio en los flujos energéticos que lo sostienen; es decir el reemplazo de aquellos de origen fósil, dadas las emisiones de carbono generadas, por otros de fuente renovable. El punto radica, tal como se plantea en el capítulo anterior, donde se han analizado los parámetros técnicos de las energías renovables, en que estas no pueden, al menos hasta el momento, aportar la energía neta de las fuentes que vienen a reemplazar. Dicho esto ¿no sería necesario, entonces, plantear un esquema de menor consumo general?

4) Electrificación de usos finales de la energía. Expandir la participación directa de la electricidad en el total de energía final consumida (TEFC).

De acuerdo con el WETO 2022 de IRENA la electricidad se convertirá en el vector de energía dominante en los sistemas de energías limpias por venir. La participación de la electrificación directa en el TEFC debe alcanzar el 30% para 2030 y exceder el 50% al 2050, partiendo del 21% medido en 2019, para lograr el objetivo de los 1.5°C. La agencia señala, respetando la lógica de su trabajo, que las estrategias de electrificación deben estar en armonía con el despliegue de las energías renovables en el sector energético. La cuarta avenida se edifica, entre otras, sobre la base de siguientes políticas, medidas y propuestas:

- a. Estrategias de electrificación que tengan en cuenta las características locales (como las condiciones climáticas, las densidades de la población y las preferencias de los consumidores) y las necesidades futuras de electrificación.
- b. Establecer regulaciones para exponer el consumo a señales de precio (incluyendo por ejemplo tarifas por tiempo de uso, disminución o eliminación de subsidios cruzados y diferenciación del tipo de generación en la factura). La idea de esta medida es que el consumidor pueda diferenciar la calidad de la energía a partir del costo de esta. Dentro del paradigma de IRENA, los costos de la energía renovable, particularmente lo que hace a generación eléctrica tenderá a ser cada vez más bajo por lo que los consumidores demandarán más de esta en desmedro de las fuentes fósiles, creando así la exposición al precio real de la energía un efecto multiplicador para las energías renovables.
- c. Promover la reubicación de industrias de alto consumo energético en sitios con electricidad renovable de bajo costo.
- d. Apoyo vía I+D y proyectos piloto relacionados con la tecnología y los modelos de negocio de vehículo a la red (*vehicle to grid* o V2G). La tecnología de vehículo a red (V2G) o carga bidireccional es un sistema de alimentación bidireccional entre el auto y la red. Los vehículos eléctricos equipados con la tecnología V2G pueden servir como unidad de almacenamiento de energía renovable. El vehículo ayuda a regular la carga de renovables de la red, tomando energía cuando la generación se encuentra en exceso y devolviendo la carga extra en aquellos momentos que el sistema así lo requiera.

- e. Apoyar la adopción de vehículos eléctricos (mediante incentivos fiscales y financieros y considerando establecer prohibiciones al uso de vehículos con motor de combustión).
- f. Dar soporte y regulación de normas para la construcción que favorezcan la electrificación de los usos finales en el consumo de energía.

Fomentar la electrificación de los usos finales de la energía, tanto como sea posible, es una medida provechosa fundamentalmente para ganar eficiencia energética. En escenarios de flujos energéticos con menor densidad, que deberán atender configuraciones de alta densidad de potencia, cada watt generado debe ser protegido. El mayor factor limitante de esta avenida tecnológica lo constituyen, probablemente, las inversiones requeridas en infraestructura, en especial la ampliación de las redes de transporte y distribución. Se trata de decisiones donde la coyuntura tiene alto impacto y donde, en muchas ocasiones, no existen, dentro de los estados, entes reguladores de alcance nacional, tal es el caso de los Estados Unidos de América donde conviven varios sistemas no conectados.

Con respecto a las políticas donde se apunta a la prohibición para utilizar ciertas fuentes de energía se debe tener especial consideración en que estas no atenten contra las condiciones necesarias para un desarrollo equitativo aún dentro de un mismo país. Impuestos, tasas y certificaciones de neutralidad de carbono pueden tener impacto en las estructuras de precios, dejando fuera del mercado a sectores que no tienen la posibilidad de adaptarse a las nuevas reglas e incrementando, aún más, las desigualdades sociales. Flujos de energía constantes y asequibles se encuentran en el centro de toda economía real en crecimiento, el cual es un factor anterior al desarrollo en todas las concepciones de este por sobre cualquier barrera ideológica.

5) Hidrógeno y sus derivados.

De acuerdo con la perspectiva de IRENA, la producción limpia de hidrógeno y sus combustibles derivados debe ir desde los niveles intrascendentes de 2020 (0.8 millones de toneladas) a 154 millones de toneladas anuales para 2030, para lograr el objetivo de los 1.5°C de aumento promedio de la temperatura terrestre para mediados del corriente siglo.

El informe de IRENA, que se encuentra bajo análisis, aboga por la utilización de hidrógeno verde. Vale la pena aclarar que el hidrógeno se clasifica por colores, convencionalmente, a partir de la fuente de energía utilizada para completar el proceso mediante el cual se produce el hidrógeno. El hidrógeno verde se produce a partir de la electrólisis del agua utilizando energía renovable, como la solar o la eólica. El hidrógeno azul se produce a partir de la electrólisis del agua o bien a partir del reformado de gas natural o gasificación del carbón utilizando energía no renovable, como la nuclear o la fósil, pero con captura y almacenamiento de carbono para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. Como veremos hacia el final del capítulo esta alternativa es muy importante en el porfolio de inversiones de las compañías petroleras. Finalmente se encuentra también hidrógeno gris que se produce a por medio del reformado del gas natural o la gasificación, utilizado fuentes de energía no renovable, y sin captura de gases de efecto invernadero. Si bien hay más colores que denotan más fuentes de energía primaria para el proceso en cuestión, las mencionadas son las que tienen mayores posibilidades de crecer a escala y acaparan el interés de agencias y compañías dedicadas a la energía.

La quinta avenida tecnológica propone las siguientes políticas para promover el uso del hidrógeno y sus derivados:

- a. Generar estrategias nacionales de uso de hidrógeno verde que definan el nivel de participación de este en todos los sectores de uso final y apoyo necesario para atraer inversiones privadas.
- b. Trabajar en el establecimiento de prioridades sectoriales para el uso de hidrógeno verde.
- c. Establecer sistemas de certificación -garantías de origen- que permitan realizar seguimiento del origen y del ciclo de vida de las emisiones del hidrógeno.
- d. Desarrollar políticas industriales para mantener la competitividad y crear oportunidades de exportación.
- e. Promocionar mecanismos que alienten el paso desde el hidrógeno gris a hidrógeno verde y limpio.

En el terreno de las inversiones los requerimientos de la quinta avenida tecnológica tampoco son menores. Se propone pasar desde una inversión nula registrada entre 2017 y 2019 a \$133 billones de dólares por año entre 2021 y 2030 para luego aumentar a \$176 billones de dólares por año en el periodo 2031-2050.

De acuerdo con el documento en estudio y conforme a la bibliografía que ha sido consultada, el hidrógeno podría ser considerado como la más desafiante de las avenidas tecnológicas, aunque la captura y el secuestro de carbono, que serán tratados a continuación, no están lejos en términos de desafíos y escollos a superar.

Los desafíos pueden ser encontrados en varios frentes: el mercado de electrolizadores aún es un mercado de nicho, sin escala ni condiciones para satisfacer niveles de producción como los requeridos; los costos de producción del hidrógeno, en cualquiera de sus colores o sus combustibles derivados (amoníaco, metanol y kerosene), son sumamente mayores al de los combustibles fósiles tradicionales; no hay desarrollo comercial de conversores energéticos para llevar la energía química del hidrógeno a flujos térmicos o electromagnéticos y, fundamentalmente, no contamos con experiencia en el manejo a escala del hidrógeno como combustible (más allá del utilizado en la industria petroquímica, que no tiene punto de comparación con las magnitudes consignadas por él WETO 2022) ni con estructuras que permitan pensar en un desarrollo a corto plazo.

El hidrógeno aparece como un combustible carbono neutral interesante en sí mismo dado que se trata de una aplicación en donde la tecnología cuenta con importante madurez científica, si bien no sucede lo mismo con las facetas comerciales o estructurales. A su vez, el hidrógeno, se trata de una opción con buenas perspectivas para actuar como vector energético y poder competir con sistemas de acumulación de gran escala (como mega baterías o incluso represas) en el manejo del balance entre la oferta y demanda proveniente de la generación renovable.

Cuando analizamos la quinta avenida tecnológica nos volvemos a encontrar con una propensión de IRENA a la planificación y el dirigismo. Sin embargo, hay que entender las

transiciones energéticas como procesos cuya gobernanza o dicción exterior nunca ha tenido lugar en la historia de estas. A propósito de la energía y la sociedad vale la interpretar un fragmento de *Energy and Civilization a History (Smil, 2017)*: Las válvulas más notables que deben ser abiertas para liberar grandes potenciales de energía incluyen oportunidades educativas, seguridad jurídica, reglas económicas transparentes, disponibilidad adecuada de capital y condiciones que conduzcan a la realización de investigación básica. No es sorprendente, entonces, que normalmente se requieren varias generaciones para lograr flujos de energía mucho mayores o mejorados cualitativamente o para aprovechar fuentes de energía completamente nuevas a una escala significativa. El tiempo, la potencia general y la composición de los flujos de energía resultantes son extremadamente difíciles de predecir, y durante las primeras fases de tales transiciones es imposible evaluar todos los impactos eventuales que tendrán los cambios en los conversores primarios y combustibles base en la agricultura, las industrias, el transporte, los asentamientos, la guerra y el medio ambiente de la Tierra.

El punto de Smil, a quien citamos otra vez para describir las generalidades de las transiciones energéticas, nos vuelve a interrogar sobre las posibilidades de concretar una reformulación del sistema energético global completamente distinta a las anteriores, tanto en su origen como en la forma de llevarse a cabo. En la medida en que la transformación es más profunda, también sus efectos son más difíciles de predecir, es importante tener este aspecto en cuenta, dada la criticidad de la constancia de los flujos cuando se habla de sistemas energéticos.

6) Captura, almacenamiento y eliminación de CO₂.

El total de CO₂ capturado a partir de los procesos de captura y almacenamiento de carbono (CCS, del inglés Carbon Capture Secuestation), Bio Energía integrada con captura y almacenamiento de carbono (BECCS, del inglés Bio Energy with Carbon Capture Secuestation) y otras medidas que se mencionan, necesitan ganar escalabilidad hasta llegar a los 2.2 Gt CO₂ por año para 2030 partiendo de los 0.04 Gt CO₂ capturados en 2020. En esta sexta y última avenida tecnológica para lograr la transición energética se proponen fundamentalmente las siguientes políticas que promueven la captura, almacenamiento y eliminación de CO₂:

- a. Trabajar a nivel estatal en la inclusión de CCS/BECCS en los planes nacionales de energía.
- b. Otorgar incentivos financieros como créditos impositivos, garantías, inversión patrimonial directa o préstamos.
- c. Trazar una trayectoria clara para el precio del carbono a largo plazo.
- d. Apuntalar el financiamiento público para proyectos piloto de BECCS y para el uso selectivo de CCS, principalmente para capturar emisiones de proceso en industrias energético-intensivas.

La sexta avenida tecnológica va más allá de presentar desafíos difíciles de sortear, como se planteaba en el caso del uso del hidrógeno y sus derivados. Se trata de una tecnología en ciernes con escaso desarrollo comercial y total falta de infraestructura, por lo que su aplicación

tecnológica es extremadamente costosa. Así mismo, dentro de la comunidad científica, hay quienes opinan que es ineficiente y difícil de llevar a escala. Los prospectos de nuevos proyectos y las plantas piloto, hasta ahora construidas, varían entre la utilización de plantaciones específicas para realizar captura de CO₂ por intermedio del proceso de fotosíntesis (una solución que por sí sola no alcanza para dar cumplimiento a los objetivos de captura planteados por las diversas usinas de pensamiento), las instalaciones que se añaden a complejos productivos de alta emisión de carbono (como pueden ser cementeras), o directamente proyectos que plantean el secuestro del CO₂ a partir de capturas directas de aire. Las últimas soluciones mencionadas no cuentan con un grado suficiente de consenso científico en lo que respecta a su eficiencia o productividad. Mayores aún son las dudas que generan si se tiene en cuenta el nivel de inversiones que implican. No es casual que gran parte de estos proyectos, fundamentalmente lo que se quieren presentar como soluciones a escala, requieren necesariamente de un precio al carbono para poder ser viables. El precio al carbono puede venir como un impuesto por la emisión de carbono o bien ser un crédito a cuenta de quien se dedica a su captura. Este último caso, el de los créditos, suele dar lugar (como sucede con los biocombustibles) a mercados secundarios donde los mismos se comercializan y se vuelven fuentes de ingreso para el sector que ha realizado la inversión.

Finalmente, dentro de los grupos ambientalistas existe cierto recelo con esta avenida tecnológica, puesto que supone una extensión a la vida útil de los aprovechamientos fósiles. La captura de carbono se constituye como la inversión en sustentabilidad predilecta de las grandes compañías petroleras, especialmente las norteamericanas (como Chevron, cuya estrategia será analizada en la última sección de este capítulo).

La combinación entre bio-combustibles y la captura de carbono (BECCS) es parte de la avenida tecnológica y una idea en la que IRENA pone un énfasis considerable. A la falta de desarrollo de la captura de carbono (no se puede dejar de mencionar que es una solución de altísima intensidad energética) hay que sumarle que, como se dijo, los rendimientos netos sumamente bajos de energía que producen los biocombustibles y su permanente competencia por el recurso de tierra con otros usos, como la alimentación. En el estado actual de la tecnología, esta avenida no parece una opción viable.

En lo que respecta a la financiación de las avenidas tecnológicas, todas requieren un alto grado de inversión para dar cumplimiento a la meta de los 1.5°C. IRENA en el WETO 2022 dedica un apartado particular para describir la estructura de financiación necesaria, a través de la comparación de escenarios posibles. Se toma como base lo que el documento denomina "Escenario Energético Planificado", determinando las necesidades de fondos incrementales para lograr el objetivo de los 1.5°C, al cual se llegaría transitando las 6 avenidas tecnológicas antes descritas. El Escenario Energético Planificado se basa en los planes energéticos gubernamentales, objetivos y políticas declaradas al año 2020. Incluye las contribuciones determinadas a nivel nacional (NDC, del inglés *Nationally Determined Contributions*), las cuales constituyen el núcleo del Acuerdo de París (2015). El Escenario Energético Planificado no incluye las actualizaciones a las contribuciones comprometidas durante la Conferencia de las Partes número 26 desarrollada en Glasgow durante el año 2021.

En la consideración del WETO 2022, la inversión privada ocupa un lugar importante en la estructura de financiación, sin embargo, el rol asignado a la inversión pública como facilitadora de la transición energética se define como crucial. Para lograr el cumplimiento del escenario objetivo (1.5°C), IRENA estima que la financiación pública deberá incrementarse en dos órdenes de magnitud con respecto al escenario energético planificado, llegando a los \$780 Billones de dólares durante el periodo 2021-2030. En este monto se incluye la participación estatal en la conformación patrimonial de proyectos vinculados a la transición, préstamos directos o a través de agentes fiscales, y costos para la mitigación de externalidades sociales negativas (fundamentalmente desempleo) hasta que el nuevo estado de equilibrio sea alcanzado. La inversión pública, también, se supone que financiará mecanismos de eliminación de riesgos (los cuales serían necesarios para el desarrollo de tecnología específica bajo ciertos contextos). Impuestos o precios al carbón, juntamente con un régimen de transferencias monetarias entre estados, aparecen como los elementos que financiarán el incremento en el gasto público, adicionalmente se espera un mayor nivel de recaudación vía medios tradicionales, dado que se sostiene que el círculo virtuoso de la economía de la transición implicará necesariamente crecimiento económico.

La transición hacia un sector energético descarbonizado está en marcha. Se trata de un proceso complejo, que trasciende las fronteras de los estados tradicionales y cuyo resultado es incierto. Si bien no es la primera vez en su devenir que el hombre atraviesa una transición energética, la actual tiene un conjunto de características que la diferencian de las anteriores y ponen en duda la capacidad del nuevo arreglo energético para sostener el nivel de complejidad de la civilización actual. Como se dijo, a diferencia de las transiciones anteriores, en este caso, la civilización global postindustrial se dirige a una matriz con menores rendimientos netos por unidad de energía invertida (EROEI) que la actual. Es decir que la energía resultante de los procesos de captura y conversión de flujos tenderá a ser menor, incluso considerando que las fuentes de energía primaria son renovables. Por otro lado, nunca una transición energética ha tenido el grado de planificación y dirección que tiene la actual. Este último punto es fundamental en lo que respecta a los tiempos preestablecidos por los organismos multilaterales y usinas de pensamiento. Vaclav Smil sostiene que, por sobre todos los componentes que hacen a una transición, el tiempo es el factor fundamental de éxito o fracaso. De acuerdo con Smil, son varias las generaciones que se necesitan para lograr incrementos cualitativos y cuantitativos de flujos energéticos o para aprovechar fuentes de energía completamente nuevas a una escala significativa.

La posibilidad de que las avenidas tecnológicas analizadas se concreten en los tiempos que la comunidad internacional plantea supone el mayor desafío, dada la profundidad de los cambios en el comportamiento social que requieren, la magnitud de estos, la carencia de infraestructura y de experiencia en el manejo de los nuevos flujos energéticos, y el estado embrionario de varias de las tecnologías propuestas. La energía se puede definir como la capacidad de realizar un trabajo, por ende, se encuentra en el centro de toda acción material. El proceso evolutivo del hombre se describe a partir de su capacidad de capturar, procesar y almacenar flujos de energía incrementales. Estos a su vez han permitido que las civilizaciones ganen y pierdan en

complejidad (cuando no fue posible sostener el flujo energético para un determinado nivel de complejidad). Un paso en falso, allí donde se dirime la facultad del hombre para sostener su materialidad (economía real), puede implicar un colapso civilizatorio (Tainter, 1987). Siendo tal la relevancia de la cuestión energética, es fundamental que la misma se aborde desde posturas abiertas al diálogo y sin hacer un uso político partidario de la cuestión.

Segundo documento: Net Zero by 2050. A Roadmap for the Global Energy Sector. International Energy Agency (2021)

La Agencia Internacional de Energía o IEA (del inglés, *International Energy Agency*) fue creada en 1974 como un organismo autónomo de la OCED (*The Organization for Economic Cooperation and Development*). Al momento de su fundación, la misión primaria de IEA era asegurar el suministro de petróleo para los estados miembro y, si bien, la seguridad energética aún ocupa un lugar central entre las cuestiones que le conciernen, su misión actual implica un mandato con mayor amplitud, que incluye cuestiones energéticas diversas entre las cuales destacamos las concernientes al vínculo entre energía y cambio climático, la descarbonización de los sistemas energéticos, y la búsqueda permanente de sistemas energéticos asequibles y sustentables.

Esta agencia surgió como la respuesta de los países industrializados a la crisis del petróleo de 1973/1974. De allí, que en sus trabajos siempre esté presente el tema de la seguridad energética y los reparos a la concentración de la producción por parte de algunos países. En 2015, desarrollaron una estrategia de modernización que implicó pensar la seguridad energética más allá del petróleo y comenzaron a trabajar con mayor foco sobre las energías limpias y el desarrollo de políticas que apunten a la eficiencia energética. También se propuso colaborar, más estrechamente, con las denominadas economías emergentes más importantes, entre las que se encuentra la República Argentina.

Dado su origen, IEA representa en gran medida la concepción de las políticas energéticas de lo que, comúnmente, se denomina el mundo desarrollado, es decir aquellos países con mejores índices de desarrollo humano. Si bien opera en forma autónoma no deja de ser una entidad vinculada con la Organización para la Cooperación Económica y el Desarrollo (OCED) y sus conclusiones siempre guardan cierta correlación con las recomendaciones que efectúa esta organización en términos políticos amplios. Asimismo, tiene una concepción de la transición energética que, como se verá, confiere un alto grado de discrecionalidad al accionar político y otorga gran importancia al consenso ciudadano alrededor de las decisiones a tomar.

Su informe, Net Zero by 2050, comienza con un fuerte llamamiento al compromiso político, e indica que, si bien son cada vez más los países que adhieren a las metas de cero emisiones para mediados del siglo XXI, también aumentan las emisiones globales de gases de efecto invernadero. Al igual que los prospectos de otras agencias especializadas en la energía, el eje del trabajo publicado en 2021 por la Agencia Internacional de Energía gira alrededor de las acciones que deben ser tomadas para lograr el objetivo propuesto por la Conferencia de las

Partes en París (2015): cero emisiones netas en 2050 y limitar el aumento de la temperatura global a 1,5 °C. El Dr. Fatih Birol, director ejecutivo de IEA, destaca, en el prefacio del documento, que el logro del objetivo central requiere nada menos que una transformación total del sistema de energía que sustenta nuestras economías. IEA sostiene que esta transición debe ser justa e inclusiva, siendo un imperativo asegurar que las economías en desarrollo reciban asistencia financiera y tecnológica para construir sistemas energéticos que satisfagan las necesidades de poblaciones en expansión de un modo sustentable. Al afirmar que no existe, en el camino de la transición energética, un enfoque único, el informe que estamos analizado da cuenta de las diferencias existentes entre los estados nacionales y las realidades de sus poblaciones. Este punto debe verse reflejado, en la etapa de planificación y en las diferentes etapas de desarrollo económico. IEA reconoce, dentro de la planificación propuesta en el informe, que las economías ya desarrolladas alcanzarán antes que las no desarrolladas el punto de emisiones cero.

El cambio climático aparece, una vez más, como el motor de la presente transición energética. A su vez se vuelve a establecer, una relación directa entre el fenómeno y la utilización de combustibles fósiles. IEA sostiene que el sector energético produce alrededor de dos tercios de las emisiones que serían las responsables del efecto invernadero. Transformar al sector energético se convierte, luego, en una necesidad consistente con los esfuerzos para limitar el aumento a largo plazo de la temperatura media mundial a 1,5 °C. Objetivo que conforme al Acuerdo de París (2015) implica reducir las emisiones a cero para el año 2050. Si bien el documento en análisis es optimista, en lo que respecta al consenso de los países sobre esta necesidad, no deja de remarcar la falta de comprensión sobre los cambios requeridos. La necesidad de acción y compromiso gubernamental, a partir de la creación y promoción de políticas climáticas y energéticas, es el centro de la estrategia que IEA plantea como recorrido hacia las emisiones cero. Como se dijo, IEA es una agencia compuesta por Estados, por lo que no debe sorprender que su prospecto para la transición energética tenga un enfoque de naturaleza más bien política. Este último punto se torna más evidente cuando lo comparamos con el documento analizado en el apartado anterior. El prospecto para la transición energética publicado por IRENA tiene un carácter de orden más técnico que político.

A partir del Acuerdo de París (COP21), se comenzó a trabajar, a nivel estatal, con un sistema de compromisos. Los Estados se comprometen a reducir sus emisiones, en determinado porcentaje o cantidad de gigatoneladas de CO₂, hacia una fecha futura. Los compromisos se realizan teniendo en cuenta el nivel general de emisiones del país o también pueden ser enunciados para sectores específicos de la economía. La cuestión estriba en que, mayormente, los estados que realizan los compromisos no son los responsables directos de las emisiones sino las compañías que operan en sus territorios. Por lo tanto, los estados gestionan los compromisos asumidos, por ahora no vinculantes, a partir de políticas y medidas específicas que obliguen o persuadan a las empresas privadas a cooperar con el acuerdo. El Net Zero by 2050 de IEA se estructura alrededor de recomendaciones, desde una perspectiva global, para incrementar la eficiencia de estos paquetes de medidas. IEA reconoce que no todos los estados comienzan desde el mismo punto de partida o llegarán al objetivo de cero emisiones al mismo

tiempo, indica que las economías avanzadas deberán hacerlo antes que los mercados emergentes y en desarrollo, asistiendo las primeras a las últimas.

Una vez más, nos encontramos con que uno de los retos más desafiantes, que conlleva la presente transición energética, viene dado por la cuestión tecnológica. Para que las nuevas energías ocupen un lugar predominante en la matriz energética es necesario que ciertas tecnologías se desarrollen a escala comercial y operativa. IEA sostiene que, en su plan hacia las emisiones cero, es fundamental el despliegue inmediato y masivo de todas las tecnologías energéticas limpias y eficientes disponibles. De los ejercicios de prospección planteados, surge que, para el año 2030, la economía global sería 40% más grande que la actual en lo que respecta a la producción total de bienes y servicios, pero usaría un 7% menos de energía. Para lograr un resultado así la tasa anual de mejora en eficiencia energética (energía utilizada por unidad de Producto Bruto Interno) debería lograr un promedio anual del 4% hasta 2030 a nivel global.

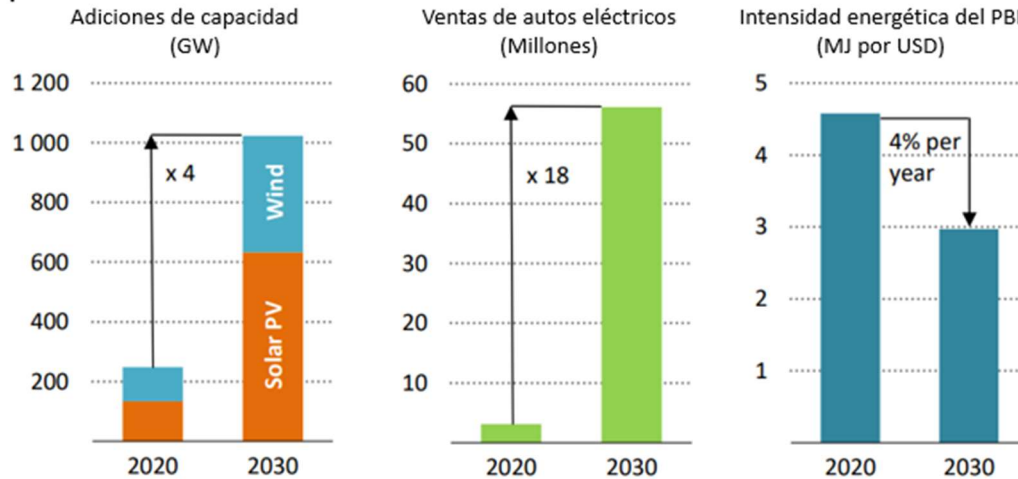
En lo que respecta al panorama para el 2050, IEA plantea, siguiendo el trazado de una eficiencia energética sin precedentes, que la demanda global de energía sería un 8% menor que la actual, pero se correspondería a una economía dos veces más grande que la actual y a una población global incrementada en 2 billones de personas. Los cambios en el comportamiento de la demanda, si bien son mencionados, no ocupan el lugar que deberían tener conforme con los autores citados en el primer capítulo de la presente tesis. La noción de consumo, su vínculo con los límites y la idea de que el desarrollo puede limitarse no están presentes en el prospecto del Nat zero by 2050.

La energía solar y la eólica son las elegidas como base para concretar la transición. Se estima que, para cumplir con el objetivo de emisiones cero, deberían realizarse adiciones anuales de 630 gigavatios (GW) de generación solar fotovoltaica y 390 GW de generación eólica por año, hasta el 2030; lo que sería equivalente a cuadruplicar el récord de capacidad instalado en el 2020. A modo de ejemplo, en el caso de la energía solar fotovoltaica, lo antes dicho equivale a instalar el parque de generación solar más grande del mundo cada día hasta el año 2030. De aquí se desprende que, de acuerdo con el prospecto de IEA, la energía eléctrica y, por ende, la electrificación de usos finales de la energía, estarán en el centro de la escena tecnológica y económica productiva durante los próximos años.

En el gráfico 1, a continuación, se pueden observar las adiciones necesarias en la capacidad de generación eléctrica solar y fotovoltaica, así como el impacto de la electrificación, antes mencionada en lo que hace al transporte y las mejoras en la intensidad energética del PBI que de acuerdo con el documento analizado son necesarias para lograr los objetivos para la transición que se planteó IEA.

La transición energética como un límite al desarrollo en un contexto de globalización e interdependencia

Aumento de las tecnologías clave para el año 2030 en el camino a las cero emisiones netas planteado por IEA



MJ: megajoules PBI: Producto Bruto Interno expresado en términos de paridad del poder adquisitivo

Cuando discurrimos por las páginas de los prospectos, proyectos o planes para la transición energética actual, invariablemente surge la cuestión del cómo de cómo movilizar el aparato productivo y de consumo global desde la utilización de fuentes de energías fósiles, con alto grado de emisiones, a energías limpias, teniendo en cuenta que las segundas no tienen la eficiencia de las primeras y que el reemplazo implica una inversión de recursos hasta el momento nunca vista. Recurrentemente, la respuesta que las agencias internacionales de energía y los organismos multinacionales ofrecen apunta a generar normativa y regular el mercado, a partir de intervenciones fundamentalmente del lado de la oferta, aunque también se plantean algunas medidas desde el lado de la demanda. En el análisis de los documentos realizados se constata que la cantidad de propuestas para la demanda e incluso el énfasis en las mismas es mucho menor que lo observado en lado de la oferta de energía. Así mismo, para que los mecanismos regulatorios tengan efecto deben ser legítimos, es decir, tener un grado amplio de consenso en la sociedad en la que van a ser aplicados, ya que esta será la que afronte los costos y las consecuencias. Como se mencionó en el capítulo anterior, la transición energética depende, antes que, de desarrollos tecnológicos e inversiones estructurales, del grado de aceptación que sus consecuencias tengan sobre la sociedad global e interdependiente en la que vivimos.

Como se dijo, Net Zero by 2050 de IEA cuenta con definiciones vinculadas al párrafo anterior y, es posible que este aspecto sea una de sus contribuciones más valiosas al entendimiento de la transición energética. IEA sostiene que una transición de la escala y con la velocidad planteada en su propio prospecto (en este sentido, similar al de las otras agencias y organismos) no puede concretarse sin un apoyo sostenido ni sin la participación de la ciudadanía. Los cambios planteados afectarán múltiples aspectos de la vida cotidiana, desde el transporte, la calefacción

y la cocina, hasta la desaparición y creación de millones de puestos de trabajo. IEA estipula que, de seguir el camino planteado, la transición del sector energético a un estado de emisiones cero creará alrededor de 14 millones de puestos de trabajo basados en la inversión en energías limpias hacia el 2030. A su vez, la adaptación de las industrias de consumo masivo, transporte y construcción requerirá 16 millones de trabajadores adicionales. Sin embargo, estas oportunidades se darán, muy probablemente, en regiones y sectores distintos de los que se esperan recortes a partir del abandono de la energía fósil. Se estima que cinco millones de empleos serán obsoletos en el sector energético, por lo que será fundamental que se tengan en cuenta los cambios estructurales que implicarán las pérdidas masivas de empleo. Una vez más, en el informe se destaca la necesidad de acciones políticas para seguir adelante.

Las cuestiones mencionadas nos invitan a incorporar el concepto de trilema energético, una cuestión compleja en el ámbito de la política energética que se refiere a la interacción de tres objetivos fundamentales: seguridad energética, sostenibilidad ambiental y accesibilidad económica. La seguridad energética implica la necesidad de garantizar un suministro ininterrumpido y confiable de energía para satisfacer las demandas de una sociedad. Por otro lado, la sostenibilidad ambiental se refiere a la imperativa reducción de los impactos ambientales asociados con la producción y consumo de energía, incluyendo la mitigación de emisiones de gases de efecto invernadero y la minimización de otros efectos perjudiciales. Finalmente, la accesibilidad económica se centra en asegurar que los costos energéticos no sean prohibitivos para los consumidores y las empresas, evitando así cargas económicas excesivas.

La complejidad del trilema energético radica en la interconexión y, a menudo, el conflicto entre estos tres objetivos. Por ejemplo, la transición energética actual, que ya ha sido definida, puede aumentar los costos de la energía, lo que a su vez podría tener un impacto adverso en la accesibilidad económica. Del mismo modo, la dependencia de fuentes de energía convencionales para garantizar la seguridad energética podría tener consecuencias significativas para la sostenibilidad ambiental.

La resolución de este trilema requiere una consideración cuidadosa y un equilibrio estratégico. Esto implica la adopción de políticas que busquen optimizar estos tres objetivos en conjunto, considerando las necesidades y las circunstancias específicas de una región o país.

Otro aspecto fundamental en el informe es el relacionado con la mencionada seguridad energética, un concepto amplio, en gran medida vinculado a la seguridad nacional, ya que al hablar sobre acciones que impactan directamente en el suministro energético de las poblaciones, se pone en juego la supervivencia de las naciones como tal. Es necesario que el modelo energético sea sustentable y, por ende, sostenible en el tiempo para garantizar el acceso de las poblaciones. Una de las grandes cuestiones que plantea el reemplazo de las energías de origen fósil por otras de fuentes renovables está vinculado a cómo se configuraría un nuevo escenario de seguridad energética. La intermitencia, en paralelo a las dificultades de almacenamiento que supone la energía renovable, incrementa los riesgos en este punto. Dado el orden político de la cuestión, IEA no deja de tratar el tema (sin duda, otro acierto del documento) planteando que la contracción de la producción de petróleo y gas natural tendrá

implicancias de gran alcance para todos los países y empresas que producen estas fuentes de energía.

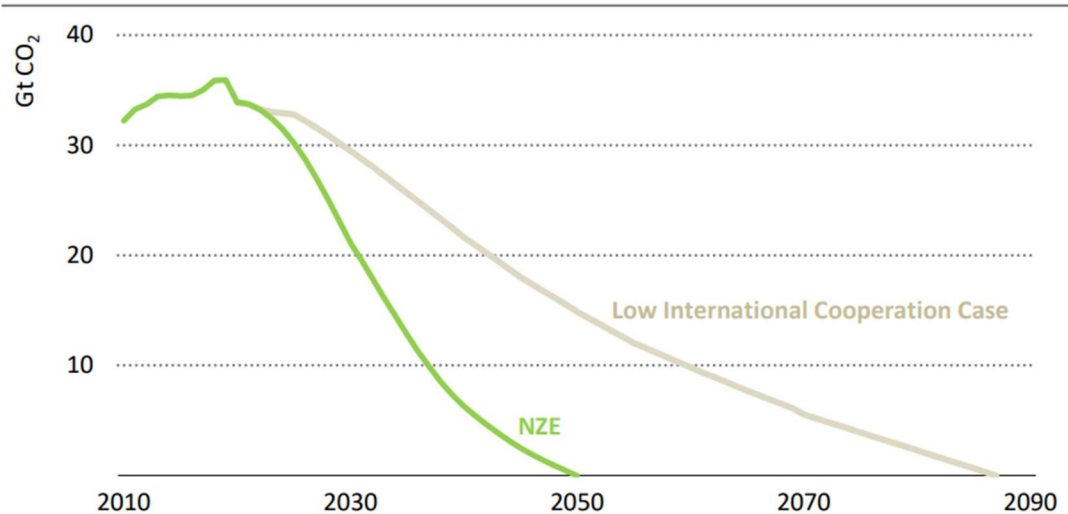
El informe de IEA para alcanzar las cero emisiones hacia el año 2050 supone que no se agreguen nuevas explotaciones de hidrocarburos, aunque se reconoce que se deben seguir explotando, hasta cierto punto, aquellas en donde ya se lo está haciendo con más eficiencia. Vale la pena mencionar que la explotación de los yacimientos más eficientes o aquellos con mejor EROEI en combinación con algún tipo de captura y secuestro de emisiones es una de las propuestas que mayor fuerza tiene en el mundo de las corporaciones petroleras para hacer frente a la transición energética. Esta situación implicaría una concentración de la producción en los países miembros de la OPEC cercana al 52% para 2050. Sin lugar a duda, esto generaría un nuevo escenario en relación con la seguridad energética global, donde no solo serían importantes los ingresos de nueva generación renovable sino también el esquema de las relaciones internacionales a establecerse. En lo que hace a los riesgos de seguridad energética IEA sostiene que:

“Garantizar un suministro ininterrumpido y fiable de energía y productos básicos relacionados con la energía a precios asequibles será cada vez más importante en el camino hacia las emisiones netas cero. (...) El enfoque de la seguridad energética evolucionará a medida que aumente la dependencia a la electricidad renovable y disminuya el papel del petróleo y el gas. Las vulnerabilidades potenciales de la importancia creciente de la electricidad son la variabilidad del suministro y los riesgos de ciberseguridad. Los gobiernos tienen que crear mercados para la inversión en baterías, soluciones digitales y redes eléctricas que recompensen la flexibilidad y permitan un suministro adecuado y fiable de electricidad. La creciente dependencia de los minerales críticos necesarios para las tecnologías clave de energía limpia exige nuevos mecanismos internacionales que garanticen tanto la disponibilidad oportuna de los suministros como la producción sostenible. Al mismo tiempo, los problemas tradicionales de la energía no desaparecerán, ya que la producción de petróleo se concentrará cada vez más.”
(traducción propia, IEA, 2021:23)

Para conseguir el objetivo de emisiones cero para el 2050, se apunta a la cooperación internacional en materia de compromiso político, legitimidad de las medidas a tomar, inversión en tecnología aplicada a la eficiencia energética, reestructuración de los mercados laborales y seguridad energética. Aunque estos mecanismos de intercambio y ayuda no se limitan al ámbito estatal y a las compañías dedicadas a la energía, sino que los inversores y la ciudadanía también están llamados a tomar acciones para que la propuesta de IEA pueda concretarse, en última instancia, las recomendaciones de la agencia tienen siempre un enfoque apuntado al plano gubernamental. IEA considera que la cooperación internacional debe ser llevada hasta un nuevo nivel, hasta ahora desconocido. En el Nat Zero by 3050 se destaca que:

La transición energética como un límite al desarrollo en un contexto de globalización e interdependencia

“No se trata simplemente de que todos los gobiernos intenten reducir sus emisiones nacionales a cero, la cuestión radica en abordar retos mundiales a partir de acciones coordinadas. (...) Sin una mayor cooperación internacional, las emisiones mundiales de CO₂ no llegarán al cero neto en 2050.” (traducción propia, IEA, 2021: 25)



Reducción de emisiones globales de CO₂ en escenarios con alta cooperación internacional (NZE) y baja cooperación internacional (Low International Cooperation Case). (IEA, 2021: P25)

El conjunto de ideas para lograr una transición energética que implique reducir las emisiones netas de gases de efecto invernadero a cero para el año 2050 propuesto por la Agencia Internacional de Energía y analizado en párrafos anteriores constituye un conjunto de aspiraciones y declaraciones de valor buenas en sí mismas. Proponer un conjunto de desarrollos tecnológicos de alta complejidad que cuenten con el aval de la ciudadanía, dado su alto grado de impacto en las estructuras sociales actuales, a partir de acuerdos de inversión público-privada, en un ámbito de confianza y cooperación multilateral, sustentando en un marco regulatorio transnacional es, ciertamente, la base necesaria para los desafíos que se plantean. Sin embargo, los parámetros técnicos que hemos seleccionado en el capítulo anterior se presentan como luces de alarma en un tablero de vuelo cuando las nuevas fuentes de energía son comparadas con las que constituyen la matriz energética actual. La menor densidad de potencia calculada para las energías renovables frente a la generada por las fuentes fósiles plantea, a partir de la cuestión del espacio, una incongruencia con los usos de la energía actual. Las megaciudades, el consumo masivo de bienes y servicios, y la existencia de un sistema de comercio globalizado basado en el transporte de larga distancia, no parecen ser sostenibles, tal y como los conocemos hoy, por un sistema energético basado en las energías renovables. Por otra parte, del estudio de las tasas de retorno energético neto (EROEI) surge el hecho de que las energías renovables entregan menos energía, por unidad de energía invertida, que las fuentes de origen fósil. Al mismo tiempo, se ha constatado que la tasa de retorno energético de las propias fuentes de origen fósil es cada vez menor producto de la explotación sostenida en

el tiempo de los aprovechamientos con mejores retornos. Conforme a la teoría de Charles Hall, la humanidad iría hacia un escenario de menor energía disponible.

Los prospectos para la transición energética que se analizaron, fueron seleccionados por ser representativos de un amplio universo de documentos; se caracterizan por hacer énfasis en medidas asociadas a la oferta de energía, asumiendo incluso el crecimiento de tanto de la población como de la economía. Es decir, que mejoras en la eficiencia energética mediante, proponen aún una mayor utilización de energía en términos absolutos. Así mismo, la diferencia entre los menores rendimientos energéticos de las energías renovables, constitutivas de la matriz energética objetivo, y la mayor demanda de energía esperada no parecen constituir un límite a los prospectos, ni siquiera en relación con el tiempo propuesto para cumplirlos. La discrepancia entre la energía disponible, conforme a los parámetros técnicos analizados, y la que requerirían una población y una economía aún mayores que las actuales se solucionaría, de acuerdo con estos documentos y otros similares, con mayor desarrollo tecnológico, lo que también implica mayor inversión. De este modo, en el contexto de la transición energética, aparece, implícitamente, la noción de *Deus est machina* aplicada a la tecnología. Las mejoras tecnológicas, aplicadas a los sistemas de captura de flujos de energía renovables, serían capaces de solucionar, sin dificultad aparente, los inconvenientes asociados a la densidad de potencia y los bajos retornos de energía neta que estos presentan cuando se los compara con las fuentes fósiles o tradicionales de energía. La idea que una mejora tecnológica, aún no conocida, será capaz de resolver las cuestiones pendientes sin un cambio sustancial en la concepción de la vida y las satisfacciones que la sociedad tiene, presupone un cambio a partir de una tecnología disruptiva que se genere y desarrolle en un tiempo récord. Sin embargo, vale la pena recordar la idea Smil con respecto al tiempo y a las transiciones energéticas, éstas son procesos largos que suelen medirse en décadas y no en años.

Tercer Documento: Chevron Climate change resilience: advancing a lower carbon future. Chevron -2021

Luego de haber analizado los prospectos para la transición energética publicados por dos agencias internacionales, consideramos que resulta enriquecedor, a fin de obtener una visión amplia de la transición, incorporar las perspectivas de la industria de la energía. Con esa finalidad, se analiza la publicación de Chevron "*Climate change resilience: Advancing a lower carbon future*" (2021). Se trata de un informe, principalmente dirigido a los grupos de interés vinculados a la compañía, sean estos inversores actuales o potenciales, empleados y ejecutivos, gobiernos de aquellos países en donde se encuentran situadas sus operaciones, y cualquier otro sector de la sociedad que pudiera verse afectado por sus acciones. El objetivo de la publicación es dar a conocer el enfoque con el que la empresa afrontará los años venideros signados por la transición energética actual. Por intermedio del documento en cuestión, la compañía busca probar su capacidad de adaptación frente a una situación que en principio le sería adversa. Lo hace, demostrando su capacidad para adaptar sus operaciones, a través de la conjunción de estructura organizacional, mercados y compromiso de avanzar hacia un futuro

con menos carbono aun cuando la explotación de fuentes de energía fósil ha sido su negocio principal durante más de cien años.

La elección del documento de Chevron se basa, no solo, en que se trata de una de las cuatro compañías petroleras, o compañías de energía, tal como ellas mismas se definen, de capitales privados más grandes del mundo (las otra tres son ExxonMobil, Shell y BP), sino también en la estructuración de un planteo claro y directo, con respecto a la transición energética. Antes de adentrarnos en los detalles del documento, vale la pena repasar una declaración del CEO (*Chief Executive Officer*) de la compañía, realizada en el marco de la conferencia CERAWEEK(2023) y recogida por un artículo del diario La Nación de Argentina, así como también el contenido de la carta (la mayor parte de los prospectos o documentos de la índole de los analizados se inician con una carta del líder de la organización emisora) con la que se introduce el documento. Las dos expresiones permiten ejemplificar lo mencionado con respecto a la selección de la publicación y la empresa en cuestión.

Conforme consigna La Nación, durante la CERAWEEK 2023, el CEO de Chevron, Mike Wirth, se refirió a la transición energética actual remarcando en su ponencia los términos “balance” y “transición ordenada”:

La gente habla de una ‘transición justa’. Pero ese es un término indefinido. Yo uso un término diferente, como ‘transición ordenada’. La energía debe seguir siendo asequible para los consumidores. Una transición desordenada podría ser dolorosa, podría ser caótica. Podríamos perder apoyo si el caos abrumba. (...) Para la transición energética, el mundo que hoy funciona con el ‘sistema A’, necesita pasar al ‘sistema B’. Sin embargo, este último funciona solo en un pequeño porcentaje y aún se está probando y desarrollando”. (La Nación, 2023. Ed. online)

En lo que respecta a la carta introductoria contenida en el documento de Chevron que está siendo analizado, el CEO de la compañía ofrece una visión sobre el lugar en donde se situará la organización con respecto a la transición energética. Dejando en claro que productores y usuarios de combustibles tienen intereses y responsabilidades distintas:

Las industrias esenciales que han ayudado a construir la sociedad moderna, como el transporte, la agricultura y la manufactura, desean encontrar formas viables de reducir la intensidad de carbono de sus operaciones. Nuestro trabajo para crear combustibles del futuro -como el hidrógeno, el diésel renovable y el combustible de aviación sostenible- pretende reducir la intensidad de carbono de estos productos y apoyar los esfuerzos de nuestros clientes para reducir sus

emisiones de gases de efecto invernadero. (...). Nuestra estrategia es sencilla: Ser líderes en la producción eficiente y con menos emisiones de carbono de energía tradicional, muy demandada hoy y en los años venideros, al tiempo que desarrollamos negocios con bajas emisiones de carbono que serán una parte más importante del futuro. (Traducción propia. Chevron, 2021:1).

Se entiende que Chevron propone una transición energética donde el orden juega un papel fundamental. En términos de desarrollo sostenible se sigue el precepto de la seguridad energética, entendiendo a la misma como el aseguramiento de un flujo constante y asequible de la misma, y se presenta con fuerza un escenario que parecería estar vedado en los prospectos estudiados con anterioridad. Nos referimos a un futuro donde la producción de gas y petróleo todavía existen, pero se ejecutan en un marco de eficiencia ambiental. Chevron plantea una visión del futuro a partir del mejoramiento de aquello que hoy existe y funciona, sin dejar de aceptar que este sistema tiene que ser reemplazado. Hay una noción de sustentabilidad implícita en el planteo de la transición energética, realizado por la compañía, que le otorga una perspectiva sumamente interesante para comprender mejor la transición energética y las posibilidades de asegurar el desarrollo en el marco de esta. En cierto modo cuando Wirth señala la necesidad de una transición energética ordenada podemos entrever los conceptos mencionados en el primer capítulo de las tesis pertenecientes a Smil, Hall y a Tainter. El desorden vendría dado por intentar avanzar hacia una matriz energética global que no sería capaz, por lo menos en este momento, de satisfacer las necesidades de seguridad energética que el estado de la civilización actual requiere. De este modo el orden citado, implicaría ir avanzando hacia el sistema energético que se tiene por objetivo trabajando sobre la base y el uso eficiente de lo que ya existe.

El CEO destaca en su mensaje de apertura que, para lograr un cambio de escala, es decir trascendente o con impacto real, se requiere la colaboración de toda la industria energética. La definición de éxito en el futuro planteada implica continuar produciendo energía, cada vez más limpia, asequible y confiable en una escala global. En lo que respecta al abordaje de la transición energética, que Chevron denomina “futuro con menor emisión de carbono”, se plantea a la misma como una ventana de oportunidades (Chevron es una compañía y por ello generar ganancias para sus accionistas en su razón de ser) tanto para la compañía en sí misma como para sus clientes. Estos son definidos como industrias esenciales que han contribuido a construir la sociedad moderna: transporte, agricultura y manufactura. Destaca que estas industrias esenciales buscan encontrar formas viables de reducir la intensidad de carbono de sus operaciones y el aporte de Chevron estaría en colaborar con estos para que logren reducir la intensidad de carbono de sus productos y así reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero. Como ya fue mencionado y a su vez se verá en más detalle durante las páginas siguientes, resulta sumamente esclarecedor para comprender la postura de Chevron la separación que hace la compañía en lo que respecta a su rol como productor de combustibles y las responsabilidades que le caben a los usuarios del mismo. Amplía de este modo la esfera de la transición energética dándole así un lugar relevante a los sectores que demandan energía.

La transición energética como un límite al desarrollo en un contexto de globalización e interdependencia

Más precisamente, señala Wirth, la compañía establecerá su aporte por la vía de nuevos combustibles como podrían ser el hidrógeno, el diésel renovable (no es bio diésel) y el combustible de aviación sostenible; también destaca la oportunidad de almacenar carbono en la superficie y en el subsuelo, lo cual es fundamental para lograr los objetivos globales de neutralidad de carbono. La separación de estamentos y responsabilidades, así como la declaración de las contribuciones a realizar se hace sin perder nunca de vista el objetivo de liderar la producción eficiente y de menor emisión de carbono de la energía tradicional, que sigue siendo altamente demandada en la actualidad y se estima lo seguirá siendo en los próximos años.

Vale la pena realizar una pequeña aclaración en lo que respecta al diésel renovable y el combustible de avión sostenible. Estos combustibles no deben ser confundidos con los denominados biocombustibles. Si bien comparten materias primas, como lo son los aceites vegetales o animales, su diferencia principal radica en su proceso productivo: fundamentalmente, el diésel renovable y el combustible de avión sostenible o Bio Jet son producidos vía hidrotreamiento, una combinación de crackeo con hidrógeno y exposición a elementos catalizadores que producen combustibles susceptibles de ser usados en motores convencionales. El hidrotreamiento es un proceso de uso convencional en la refinación de combustibles fósiles lo que permite a su vez que tanto el diésel renovable como el bio jet puedan ser producidos en refinerías tradicionales.

Más allá de anticipar cuáles serán los proyectos con los que la organización competirá en la transición energética (nuevos combustibles sobre la base del hidrógeno y captura y secuestro de carbono) y reafirmar la importancia de la producción actual de hidrocarburos, uno de los aportes estratégicos más interesantes, que se despliega en el documento, es la segregación de las responsabilidades en lo que confiere a las emisiones. La compañía indica que generará valor poniendo a disposición de sus clientes elementos para que estos puedan reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero. De este modo, quedan disociados los agentes que explotan los flujos de energía de aquellos que los consumen. Chevron da un paso audaz en la construcción del debate para la transición energética incorporando al consumidor de energía como emisor de carbono a partir del uso de los combustibles tradicionales. La compañía se planteó, en el 2021, año de emisión del informe, lograr cero emisiones netas de alcance 1 y 2 en su negocio de *upstream* para el año 2050. Este objetivo suscitó gran interés dentro de la industria de la energía porque era la primera de las “*big four*” de origen estadounidenses en declararlo. ExxonMobil, la otra de las “*big four*” norteamericanas, proclamó un objetivo similar en 2022 (no indicó que la reducción de las emisiones de alcance 1 y 2 será solo para sus operaciones del *upstream* aunque determinó que se aplicaría a sus activos operados, lo que incluye sus refinerías. No debe hacerse una lectura que lleve a pensar en ExxonMobil como una compañía que está arriesgando más en términos de control de emisiones, se trata simplemente de un modelo de negocios con mayor presencia en el *downstream* por lo que limitarse solo al *upstream* hubiese sido leído como una falta de compromiso). De acuerdo con la guía que provee la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos, EPA, (*Environmental Protection Agency*): “Las emisiones de alcance 1 son emisiones directas de gases de efecto invernadero (GEI) que proceden de fuentes controladas o propiedad de una organización (por ejemplo, emisiones

asociadas a la combustión de combustibles en calderas, hornos, vehículos). Las emisiones de alcance 2 son emisiones indirectas de GEI asociadas a la compra de electricidad, vapor, calor o refrigeración. Aunque las emisiones de alcance 2 se producen físicamente en las instalaciones donde se generan, se contabilizan en el inventario de GEI de una organización porque son el resultado del uso de energía de la organización”¹¹. (Trad. Propia. 2023, *EPA Center for Corporate Climate Leadership*, consulta en línea EPA).

Con respecto a las emisiones de alcance 3 la guía de la EPA las describe del siguiente modo: “Las emisiones de alcance 3 son el resultado de actividades de activos que no son propiedad ni están controlados por la organización informante, pero a los que la organización afecta indirectamente en su cadena de valor. Las emisiones de alcance 3 incluyen todas las fuentes que no están dentro de los límites de alcance 1 y 2 de una organización. Las emisiones de alcance 3 de una organización son las emisiones de alcance 1 y 2 de otra organización. Las emisiones de alcance 3, también denominadas emisiones de la cadena de valor suelen representar la mayor parte de las emisiones totales de gases de efecto invernadero (GEI) de una organización.”^{12 13}. (Trad. Propia. 2023, *EPA Center for Corporate Climate Leadership*, consulta en línea EPA).

Con las definiciones de alcance de las emisiones de EPA podemos ver aún más claramente el planteo estratégico que hace Chevron. La compañía declara que pondrá a disposición productos

¹¹ <https://www.epa.gov/climateleadership/scope-1-and-scope-2-inventory-guidance>

Scope 1 emissions are direct greenhouse (GHG) emissions that occur from sources that are controlled or owned by an organization (e.g., emissions associated with fuel combustion in boilers, furnaces, vehicles). Scope 2 emissions are indirect GHG emissions associated with the purchase of electricity, steam, heat, or cooling. Although scope 2 emissions physically occur at the facility where they are generated, they are accounted for in an organization’s GHG inventory because they are a result of the organization’s energy use.

¹² <https://www.epa.gov/climateleadership/scope-3-inventory-guidance>

Scope 3 emissions are the result of activities from assets not owned or controlled by the reporting organization, but that the organization indirectly affects in its value chain. Scope 3 emissions include all sources not within an organization’s scope 1 and 2 boundary. The scope 3 emissions for one organization are the scope 1 and 2 emissions of another organization. Scope 3 emissions, also referred to as value chain emissions, often represent the majority of an organization’s total greenhouse gas (GHG) emissions.

¹³ <https://www.epa.gov/climateleadership/scope-1-and-scope-2-inventory-guidance>

Scope 1 emissions are direct greenhouse (GHG) emissions that occur from sources that are controlled or owned by an organization (e.g., emissions associated with fuel combustion in boilers, furnaces, vehicles). Scope 2 emissions are indirect GHG emissions associated with the purchase of electricity, steam, heat, or cooling. Although scope 2 emissions physically occur at the facility where they are generated, they are accounted for in an organization’s GHG inventory because they are a result of the organization’s energy use.

con bajo contenido de carbón que permitirían, a los usuarios de energía, lidiar con sus emisiones de gases de efecto invernadero, pero no se constituye como responsable de estas. Es decir, las emisiones de alcance 3 de la compañía son entendidas como una responsabilidad de los usuarios. A través de las definiciones de EPA, puede apreciarse cómo se ejerce presión desde el ente regulador aguas arriba de la cadena de valor del sector energético al indicar que las emisiones de alcance 3 suelen representar la mayor parte de las emisiones de una organización. La cuestión alrededor de la responsabilidad de estas emisiones ya ocupa, y seguirá ocupando, un lugar muy importante en el debate sobre el marco regulatorio de la transición energética. Una vez más, insistimos en que el aporte fundamental de Chevron viene dado por la claridad con la que plantea su posición.

Igualmente, la compañía reconoce, en la publicación, que las emisiones de alcance 3 son las más grandes en lo que hace a las emisiones asociadas a la actividad de la compañía. Por ese motivo, en aras de la transparencia, es que en se introdujo justamente en el documento que estamos analizando un indicador denominado PCI (*Portfolio Carbon Intensity*). Este es una métrica que representa la intensidad de carbono a través toda la cadena de valor asociada a la comercialización de los productos, incluido el uso de los productos vendidos, lo que implicaría mostrar el impacto emisiones de alcance 3. Dar cuenta de esta información a partir de la elaboración del PCI no implica en términos de la compañía ser responsable de las mismas.

En términos estrictamente estratégicos, lo que incluye tanto la visión de negocios como la tecnología necesaria para llevarlos adelante, la compañía entiende que es esencial para lograr un mundo más próspero contar con energía segura, confiable (en términos de suministro), cada vez más limpia y a precios asequibles. En línea con los prospectos energéticos más difundidos, se hace eco del hecho de que la demanda de energía se encuentra en picos históricos y continuará en aumento. Se da por sentado que los combustibles fósiles, los cuales produce, seguirán teniendo un lugar significativo en el mix de oferta de energía hasta que, paulatinamente, se vayan incorporando fuentes de baja intensidad de carbono. Se puede observar el llamado al orden de la transición que fue citado por el CEO de la empresa en los primeros párrafos de la sección.

En lo que respecta al análisis de la demanda que se hace en el documento, se trabaja sobre una hipótesis de crecimiento sostenido, fundamentalmente basado en los precios observados con anterioridad a la invasión de Rusia a Ucrania. Al tratarse de un documento emitido por una compañía que produce y vende energía no es esperable encontrar los llamamientos a la moderación del consumo vía regulación estatal que se observan en las publicaciones analizadas con anterioridad. Tampoco se consideran cambios en el estilo de vida de los países desarrollados que representa el aspiracional para los que aún se encuentran en vías de desarrollo. Haciendo uso de una idea muy propia de las compañías petroleras estadounidenses, se afirma que en la medida en que la población y el ingreso aumentan, billones de personas en los países menos desarrollados, intentan alcanzar un standard de vida más alto, lo que implica una mayor demanda de energía, aun cuando la intensidad energética de la actividad económica decline:

“A medida que mejora el ingreso, el crecimiento económico procede en mayor medida del sector servicios, que suele ser más eficiente desde el punto de vista energético y de las emisiones de carbono que el sector manufacturero. Además, es probable que los avances tecnológicos y las continuas mejoras de la eficiencia energética reduzcan aún más la intensidad energética. Estos efectos pueden ser menos dominantes en las naciones que están en proceso de industrialización y desarrollo de infraestructuras, ya que estas actividades requieren inmensos recursos energéticos” (Trad. Propia. Climate change resilience: Advancing a lower carbon future, Chevron, 2022: P13)

Es importante tener en cuenta, cuando se analiza el documento en cuestión, que el mismo tiene su origen en una compañía fundamentalmente orientada a la producción de combustibles fósiles y sus derivados petroquímicos. Como ya ha sido señalado, la publicación sigue un ánimo de lucro, propio de la razón de ser de toda empresa. A su vez, siguiendo una noción básica de economía se deduce que la compañía se mantiene en la industria y produce porque entiende que del otro lado hay un comprador dispuesto a pagar por la mercancía que la entidad pone a disposición en el mercado. De este modo, observamos una lógica fundamentalmente mercantil, que no estaba presente en las publicaciones anteriores. Éstas, emitidas por agencias conformadas, principalmente, por estados nacionales expresan su visión de la transición energética o bien a partir de una lógica técnico-ambiental, como en el caso de IRENA, o con una lógica política como el prospecto de IEA. Uno de los puntos que se subrayó en las páginas anteriores fue justamente la carencia de detalles, en ambas publicaciones, en lo que respecta a las cuestiones necesarias para financiar a la transición. En el caso de Chevron, nos encontramos, en este sentido, con una propuesta directa. La compañía destaca que el enfoque óptimo para financiar la transición sería impulsar las reducciones de emisiones que sean más rentables y eficientes en toda la economía, juntamente con la eliminación natural y por vía de la tecnología de éstas. Chevron afirma que el establecimiento de un precio al carbono, que sea aplicado de la forma más amplia y generalizada posible, es el mejor de los enfoques para sostener la reducción de emisiones.

El "*Carbon on Price*" (precio del carbono) es un mecanismo que implica establecer un precio a las emisiones de carbono con el objetivo de visibilizar los costos ambientales asociados a la liberación de gases de efecto invernadero. La idea detrás del Carbon on Price es que, al asignar un valor económico al carbono emitido, se brinda un incentivo para reducir las emisiones y fomentar la transición hacia una economía baja en carbono. Según Chevron, los mercados deben tener la capacidad de establecer un precio para el carbono, ya que esto permitiría incentivar a los productores más eficientes en términos de emisiones de carbono. Al aplicar un precio al carbono, se crea un incentivo económico para que las empresas reduzcan sus emisiones, ya que aquellas que emiten menos carbono podrían obtener beneficios financieros al vender las asignaciones o créditos de carbono no utilizados. Esto significa que los productores más eficientes en carbono serían recompensados económicamente, lo que estimularía la adopción de tecnologías más limpias y la implementación de prácticas más sostenibles. Desde el punto de vista de la demanda, un precio al carbono emitido por el productor implicaría un

aumento de los precios finales lo que llevaría al consumidor a buscar opciones energéticas más asequibles o reducir el consumo cuando lo primero no sea posible.

Como se ha mencionado, Chevron intentará atravesar la transición energética actual, en primera instancia, promoviendo una mayor eficiencia tanto energética (EROEI) como en términos de intensidad de carbono (calidad de la energía, según Smil), optimizando la producción de energías fósiles tradicionales. Por otra parte la compañía toma la noción “*Carbon on Price*” y le confiere un lugar fundamental como medio para la financiación del desarrollo de nuevas energías que apunten a sectores cuyo uso de la energía no sería sencillo de electrificar y por lo tanto de ser atendido por la vía de flujos renovables. El expertise de más de 100 años en la industria de la energía, la disponibilidad organizacional y de activos especializados adaptables, juntamente con un marco regulatorio propicio son destacados como los ejes a partir de los cuales la compañía intentará atravesar el cambio del sector energético global.

El área que la compañía denomina nuevas energías y que constituye las unidades de negocios con los que en primera instancia se plantea hacer frente a la transición energética, está compuesta por aprovechamientos de hidrógeno, captura, almacenado y uso del carbono, y programas de compensaciones de carbono.

El enfoque de Chevron respecto al hidrógeno contempla el uso de hidrógeno verde, azul y gris. La multinacional sostiene que el uso de hidrógeno azul y verde como fuente de combustible puede ayudar a reducir la cantidad de GEI (gases de efecto invernadero) que entran en la atmósfera. Aunque se considera que el hidrógeno gris no apoya directamente la descarbonización del sector energético, Chevron entiende que el uso de este, en las primeras etapas de la transición, puede ofrecer oportunidades clave para reducir el riesgo al implementar la tecnología, permitir el desarrollo de infraestructuras de apoyo, incluidas las estaciones de servicio, y contribuir a generar conocimiento acerca del manejo óptimo de los activos asociados a la exploración del recurso. La compañía espera que el crecimiento de la demanda de hidrógeno sea apalancado por las industrias pesadas y de transporte, así como también por el sector dedicado a la generación de energía eléctrica. Según datos de la agencia de información energética de los Estados Unidos (EIA, *Energy Information Agency*) e IEA el sector industrial es uno de los mayores consumidores de energía del mundo, representando aproximadamente el 37% del consumo mundial de energía. El sector incluye una amplia gama de industrias, como la manufactura, la minería, la construcción y la agricultura. En Estados Unidos, el sector industrial representó el 35% del consumo total de energía de uso final y el 33% del consumo total de energía en 2021. Dentro del sector industrial como principal consumidor de energía juega un rol sumamente importante la industria metalúrgica. La industria metalúrgica no solo es un gran usuario de energía, la necesita en grandes cantidades para el calentamiento de hornos, la fundición y la manipulación de minerales, sino que también son sus productos elementos fundamentales para la industria de la energía en sí misma: equipos, tuberías, cables y materiales estructurales son utilizados por las industrias minera, de refinado y eléctrica para producir y transportar energía.

Al igual que IRENA, en su sexta avenida tecnológica, Chevron otorga un lugar sumamente importante a las iniciativas vinculadas a captura, utilización y almacenamiento de carbono

(CCUS, *Carbon Capture, Use and Storage*). La organización detecta a partir de los proyectos de CCUS oportunidades en dos áreas: reducción de la intensidad de carbono en las operaciones existentes y desarrollo del negocio de captura como tal, fundamentalmente a partir de asociaciones con usuarios (clientes) que serían emisores de alcance 3, cómo podrían ser productores de cemento, sectores de la industria metalúrgica y petroquímica. Se destacan las sociedades establecidas con otros grandes jugadores del sector de las energías tradicionales como Schlumberger y Enterprise Products Partners L.P. Como Schlumberger y otras compañías, Chevron participa en Mendota BECCS, un proyecto, en California, que propone utilizar residuos agrícolas en la generación energía renovable, al tiempo que se captura y almacena el CO₂ producido en el proceso, permanentemente, en una formación geológica. Se espera que el proyecto, cuando esté plenamente operativo, produzca emisiones netas negativas, almacenando 300.000 toneladas de CO₂ al año. En lo que refiere a la alianza con Enterprise, ambas compañías tienen un convenio para estudiar las posibilidades de aplicación de CCUS en el golfo de México. Enterprise es una compañía modelo en el negocio del transporte por ductos y colaboraría en el diseño de sistemas de transporte para el CO₂ capturado, mientras que Chevron dispone del conocimiento para los procesos de captura en sí mismos.

Finalmente, llegamos a las compensaciones de carbono. Esta iniciativa es una de las manifestaciones prácticas del ya mencionado “*Carbon on Price*”, en este caso a partir de la compra de créditos de carbono. Chevron apunta a continuar desarrollando procesos de compensación de emisiones en aquellos sectores que no tienen oportunidades de hacer una reducción de emisiones que sean viables económicamente o las mismas se presenten, considerando el estado de la tecnología o la naturaleza de los procesos como difíciles de reducir. Las compensaciones carbono van de la mano con el establecimiento de precios transparentes para el carbono, así como el desarrollo de mercados integrados internacionalmente son fundamentales para que los mecanismos de compensación resulten eficientes. La compañía ya cuenta con un sector de su departamento de *trading* dedicado al comercio de carbono a través de bonos, registros y certificados negociables.

El aporte del pacto verde europeo para comprender la dimensión de la transición energética

En los párrafos introductorios del presente capítulo se mencionó un documento adicional. Nos referimos al Pacto Verde Europeo. Como fuera mencionado, este no es estrictamente un acuerdo que se enfoca en la transición energética, sino que comprende varios aspectos vinculados a la política medioambiental de dicha unidad política y económica. Sin embargo, al analizarlo nos encontramos con un punto que vale la pena resaltar. Nos referimos al sentido holístico que rige este acuerdo. Los tres documentos que fueron descritos en profundidad mencionan en sus introducciones, con mayor o menor claridad, y sin hacer demasiado hincapié, el hecho de que la transición energética debería implicar un cambio en todo el sistema de relaciones sociales. Solo IEA, por tener una connotación más política, profundiza la cuestión sin llegar a hacer de este punto el centro o unos de los aspectos fundamentales de su publicación.

Afirmar la posibilidad de una reforma de las estructuras sociales a partir de una modificación radical de la matriz energética no es otra cosa que recoger, en parte, las tesis de Smil y Mander-

Heinberg mencionadas en el primer capítulo. Indirectamente, Tainter también abona a este punto.

El Pacto Verde de la Comunidad Europea recoge el sentido de gran pacto social y político al estilo del *American New Deal* auspiciado por el presidente Franklin D. Roosevelt en la década de 1930 en Estados Unidos tal como plantea José Antonio Sanahuja (2021). Aunque el Pacto Verde no solo trate la transición energética, esta representa una parte fundamental del mismo y, sin dudas, es un documento que de alguna manera reformula el vínculo entre los ciudadanos. Hay un sentido de colectividad que vale la pena señalar, sin perjuicio de haber destacado, desde las páginas de este trabajo, las limitaciones que plantean los esquemas energéticos basados en las energías renovables, que tienen justamente a la Comunidad Europea como uno de sus grandes propulsores tanto políticos como económicos. Es de tal magnitud el cambio que plantea la transición energética actual que no solo es fundamental comprenderla sino también interpretarla desde el sentido más interconectado posible. Vale la pena rescatar el siguiente párrafo del documento europeo, que tiene líneas muy cercanas a lo planteado por IEA, aunque lo hace con mayor énfasis:

La participación y el compromiso de los ciudadanos y de todas las partes interesadas es crucial para el éxito del Pacto Verde Europeo. Los recientes acontecimientos políticos han puesto de manifiesto que las políticas transformadoras solo funcionan si los ciudadanos participan plenamente en su diseño. Lo que preocupa a los europeos es mantener su puesto de trabajo, poder calentar su hogar y llegar a fin de mes. Las instituciones de la UE tienen que estar a su escucha si desean que el Pacto Verde prospere y genere cambios duraderos. Los ciudadanos son y deben seguir siendo el motor de la transición. (El Pacto Verde europeo, 2019: 26).

Consideraciones finales del capítulo 2

Habiendo formulado la problemática de la transición energética a partir del análisis y la comparación de documentos representativos de las distintas visiones sobre la cuestión es posible enumerar un conjunto de aseveraciones sobre la presente transición energética que ayudan a comprender su origen, los medios por los cuales se la pretende llevar a cabo y un conjunto de desafíos que deben aún ser resueltos. Estos últimos fundamentales para las condiciones necesarias del desarrollo sostenible.

En primer lugar, podemos afirmar que la razón de ser o el porqué de esta transición energética es una cuestión medioambiental. Específicamente se parte de un consenso generalizado sobre la necesidad de reducir las emisiones de CO₂ para evitar el calentamiento global, lo que implica reformular al sector energético, puesto que es el uso de combustibles fósiles para la generación energética el principal origen de las emisiones antes mencionadas.

El resultado que implicaría una reforma radical del sector energético tal como surge de los documentos no pone frente a otra de las cuestiones que surgen del análisis para la comprensión de la transición energética actual. Nos referimos a la magnitud de esta. El impacto sobre las estructuras sociales que implicaría una nueva configuración energética surge como una realidad aceptada por las tres organizaciones y por lo tanto representativa de la presente transición energética. Es decir que no solo marchamos a una provisión de energía, sino que también lo hacemos hacia una nueva estructuración de la sociedad en función de la energía disponible.

A lo anteriormente dicho le sigue la cuestión sobre el camino a recorrer para arribar a esta nueva configuración del sistema energético global. Por una lado IRENA e IEA sostienen reformulación del sector o una nueva matriz energética que implique un nivel de cero carbono mediante el desarrollo intensivo de las energías renovables, la electrificación masiva de los usos finales de la energía y el abandono de todo combustible fósil (IRENA e IEA) mientras que por otro lado, desde la industria de la energía representada por Chevron en este caso, se propone fundamentalmente continuar con la explotación de los combustibles fósiles capturando sus emisiones sin dejar de invertir en fuentes con menor intensidad de carbono. En última instancia el manejo de las emisiones y su eliminación aparece como un punto común entre ambas visiones.

En lo que respecta a los desafíos que enfrentan, la opción de las agencias internacionales se enfrenta a las limitaciones energéticas de las energías renovables (las energías renovables más desarrolladas -solar y eólica- entregan menos energía que las fuentes fósiles tradicionales por unidad de energía invertida), la falta de infraestructura y el impacto social de rediseñar el sistema energético global en menos de 30 años. Por su parte la opción que plantean las grandes compañías energéticas (petroleras), y que hemos sintetizado en el documento de Chevron, si

bien es técnicamente más viable y hace un importante llamado al orden del proceso transitorio para evitar efectos adversos, es una postura que suscita dudas en la opinión pública en general del hemisferio norte occidental (enemistada con la idea de seguir utilizando combustibles fósiles) y que también tiene un alto componente de incertidumbre tecnológica puesto que aún no hay instalaciones de gran escala o interconectadas de CCUS operativas y su viabilidad económica está siempre vinculada al establecimiento de un precio para las emisiones de carbón que tenga validez global.

Por esto último, recogemos la idea del Pacto Verde Europeo como un ejemplo de plataforma en donde la legitimidad pública de las acciones por tomar tiene un lugar sumamente importante. La magnitud de los cambios necesariamente implica consenso y conocimiento público de la realidad por venir, sin dejar de tener en cuenta que en última instancia debe ser asegurada la provisión segura de energía para resguardar y fortalecer el proceso de desarrollo sostenible propio de la condición humana.

Conclusión

El desarrollo sustentable se caracteriza por ser una concepción del desarrollo que se centra en la capacidad que tienen las sociedades para satisfacer sus necesidades actuales, considerando que las acciones que se realizan, con ese propósito, no comprometen el porvenir de las generaciones venideras. A partir del marco que presenta esta noción, la problemática del suministro de energía, y el futuro desarrollo de la humanidad, aparece como una cuestión central. Los objetivos de desarrollo sostenible, aprobados y publicados por las Naciones Unidas en 2015, formalizan este vínculo, específicamente en el objetivo número siete, donde se afirma que se debe “garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna”. Más allá de la declaración formal citada es fundamental comprender el vínculo intrínseco entre desarrollo y energía. Como se ha visto a lo largo de este trabajo, es, prácticamente, imposible separar las cuestiones que hacen a la energía y al desarrollo. Estos conceptos están ligados indefectiblemente al futuro de las sociedades, ya sea que pensemos en una sociedad cuya estructura posea el grado de complejidad actual, ya sea que nos imaginemos una nueva sociedad con menor cantidad de arreglos estructurales para sostener, ambos escenarios serán siempre una función de la disponibilidad de energía que el hombre sea capaz de proveerse.

Las transiciones energéticas ocurridas a lo largo de la historia no solo han implicado una nueva configuración de la matriz energética, sino que también definieron crecimientos cuantitativos en la cantidad de energía disponible. En términos de Heinberg, hablamos de apropiaciones progresivas de subsidios energéticos que fueron moldeando a la sociedad tal y como la concebimos. Como se vio, la transición energética actual, desde las energías fósiles hacia las fuentes renovables, sería, a la luz de los criterios utilizados en el primer capítulo de este trabajo, la primera de las transiciones, en la historia, en donde el patrón de crecimiento energético no se estaría cotejando. Incluso como señala Smil (2010), considerando el estado actual de la tecnología asociada a los sistemas de energía de fuentes de origen renovable, se verifica un fuerte desacople entre la energía que estaría disponible y la requerida por la configuración actual de los usos de la energía. Transitamos, entonces, un camino hacia nuevos escenarios de menor disponibilidad energética, un hecho que no parece advertirse, por parte de diversos actores del sector energético, fundamentalmente en la serie de documentos analizados publicados por organizaciones multilaterales, así como tampoco se menciona el modo en que esta situación afectaría el actual estado de desarrollo social.

Cuando analizamos los prospectos y publicaciones de mayor alcance y relevancia, sobre la transición energética actual, fue posible constatar que la motivación de esta transición es la problemática medioambiental. A partir de un alto grado de consenso científico, se considera que el calentamiento global endógeno, originado fundamentalmente por las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas a la utilización de fuentes fósiles de energía, está afectando de modo negativo la vida en el planeta tierra. La solución que se plantea es una reestructuración profunda del sistema energético global. Esta reestructuración, o el modo en que ha de llevarse adelante la transición energética, presenta variaciones según los diversos participantes del sector energético global. Fue posible constatar una respuesta de orden institucionalista promovida desde las agencias internacionales para la materia y otra de carácter corporativo, representada en los lineamientos de Chevron. Aunque parten de un lugar común, estas posturas

difieren en cómo lograr la transición y en la imagen final que tendrá el sistema energético global post transición (aunque ambos enfoques coinciden en que será un sistema con menor intensidad de carbono). En lo que respecta al camino a tomar en relación a las propuestas tecnológicas para el manejo de flujos de energía, a la luz de los criterios estudiados en el primer capítulo, podemos concluir que el estado actual de la tecnología, vinculada a los sistemas energéticos que se promueven como soluciones a la transición energética (fuentes renovables), suponen, en principio, una menor disponibilidad de energía o bien no tienen un grado de desarrollo a escala que las haga viables en el mediano plazo (captura y almacenamiento de carbono), lo que implica un límite a la capacidad del hombre y su desarrollo, al menos tal como se encuentra la sociedad actual.

Desde la perspectiva del desarrollo sustentable, nos encontramos con una limitación potencial a la capacidad para satisfacer las necesidades, fundamentalmente de las generaciones presentes. Es importante señalar que, aun cuando la transición energética esté motivada por la sostenibilidad ambiental, y el desarrollo de las generaciones futuras, debe considerarse la disponibilidad energética requerida para sostener la complejidad de la sociedad actual. No hay planteo de sustentabilidad posible cuando el presente no está resuelto. En relación con este último punto, si se habla de responsabilidad intergeneracional, vale la pena rescatar las posturas de Jevons, en una lectura realizada en enero de 1867 en el Carpenter's Hall de Manchester, donde señala que la mejor manera de prepararse para el tiempo futuro es aprovechar al máximo el presente. Jevons menciona el desarrollo presente como condición necesaria para un mejoramiento de las condiciones de las generaciones futuras. Es fundamental que el planeamiento de la transición energética incorpore las diversas realidades que conviven en esta sociedad globalizada y sea capaz de establecer patrones transicionales que operen sobre la base de la equidad y la dignidad del hombre.

Durante el transcurso de este trabajo nos enfrentamos, en más de una oportunidad, con la disyuntiva de introducir, o no, la problemática del crecimiento como una cuestión directamente vinculada al desarrollo. Aunque muchas veces es utilizado como sinónimo de desarrollo, fundamentalmente en la literatura clásica-liberal, en el marco del desarrollo humano, allí donde se enmarca la concepción de desarrollo sostenible que guía este trabajo, el crecimiento es un concepto distinto. Incluso podría agregarse que, no solo existe una diferencia entre desarrollo y crecimiento, sino que, también, hay una carga negativa sobre este último. El informe al Club de Roma, publicado en 1972, bajo el título de *Limits to Growth* (Meadows, et. all) se sostiene la imposibilidad de prolongar en el tiempo los patrones de crecimiento, observados fundamentalmente a partir de la segunda guerra mundial, en el hemisferio norte occidental, a partir del desbalance entre los recursos disponibles y el consumo de estos (tesis de orden malthusiana). Algunos teóricos del desarrollo sustentable dan, incluso, un paso más y proponen modelos de organización social basados en el decrecimiento o el estancamiento. Ted Trainer (2011), en su ensayo *The radical implications of a zero growth economy*, sostiene que el crecimiento es la razón de ser de la estructura social actual y, por lo tanto, una economía de crecimiento cero, como solución a la sustentabilidad del uso de recursos, debería comenzar por un replanteo total de la sociedad. Resulta interesante que los prospectos analizados, en la segunda parte del trabajo, expresan reiteradamente, las posibilidades de crecimiento que la

transición energética supondría. Nos referimos a la mencionada economía de la transición, concepto presentado tanto por IRENA como IEA. El abordaje institucionalista de la transición energética no reniega del crecimiento de los bienes y los servicios, sino que entiende que el mismo será resultado de las externalidades positivas del conjunto de flujos materiales, financieros y también energéticos a partir de los cuales la descarbonización de la energía se transformaría en una realidad. De esta manera queda planteado un escenario complejo en lo que hace al crecimiento como subtema del desarrollo dentro de la transición energética actual. Por un lado, la línea histórica conservacionista del Club de Roma, con sus reparos a la sostenibilidad del crecimiento en general aplicado sin noción de límite, y por otro, el planteo institucionalista de la transición energética que encuentra en el crecimiento económico una externalidad positiva de la aplicación de sus principios para la transición energética. Vale recordar los postulados de Smil, Hall y Tainter consignados en el primer capítulo donde se plantean limitaciones con respecto a la cantidad de energía que las nuevas energías podrían entregar y su falta de capacidad, no solo para asegurar el crecimiento sino para sostener el estado material actual de la sociedad. El tiempo determinará las posibilidades de crecimiento sostenible en escenarios de menor disponibilidad energética.

En resumen, podría decirse que el desarrollo como tal implica acción humana. Esta acción puede agruparse en un conjunto de actos de distinta índole destinados a producir un estado de situación mejor que el anterior. A su vez toda acción, desde el pensamiento hasta la construcción de una obra de infraestructura, requiere de la utilización de energía. Es justamente la energía, por definición, una propiedad que permite que los sistemas realicen trabajo. La medida de la acción humana destinada al desarrollo es una medida de la energía que se dispone. Todo aquello susceptible de ocurrir viene dado por la energía con la que contamos. Ésta, entonces, se presenta como límite de toda actividad. En términos estrictamente abstractos la energía podría considerarse como el límite por antonomasia de la acción humana. Así como la cuestión de la energía no puede, ni debe, ser abordada únicamente por parámetros técnicos y económicos, el hombre no puede ni debe pensarse abstraído de los límites que supone la disponibilidad energética. Materia y energía. Alfa y Omega. Principio y fin.

Nota Referida a la COP28

En diciembre de 2023 mientras se realizaban las correcciones finales a este trabajo de tesis se llevaba a cabo en la ciudad emirato de Dubái, bajo la presidencia de Emiratos Árabes Unidos la COP28. Durante la misma se constataron una serie de declaraciones, acciones y comportamientos por parte de los actores de la transición energética actual que reflejaron en gran medida las cuestiones que habían sido vertidas en la segunda parte del trabajo.

Entre los puntos salientes de la COP 28 podemos mencionar: un nuevo anuncio de fondos (\$400 millones de dólares) para cooperar con aquellos países en desarrollo que han sufrido catástrofes vinculadas al cambio climático, donde otra vez no queda claro como funcionaría el fondo, el criterio de aplicación de esos fondos y las reglas anticorrupción que lo ordenarían; El compromiso firmado por 118 países de triplicar la capacidad de las energías renovables y duplicar la tasa mundial de eficiencia energética. La carta de descarbonización a la que adhirieron 50 compañías del petróleo y el gas que representan el 40% de la producción global, en la que los firmantes sostienen que intentarán alcanzar cero emisiones netas de CO₂ de alcance 1 y 2 para 2050 o antes. ExxonMobil fue uno de los firmantes, mientras que Chevron se abstuvo de hacerlo; Finalmente el mayor hito de esta conferencia de las partes estuvo dado por el documento final emitido en donde se afirma que "debemos abandonar los combustibles fósiles en los sistemas energéticos, de forma justa, ordenada y equitativa, acelerando la acción en esta década crítica, con el fin de alcanzar el objetivo de cero emisiones netas en 2050, de acuerdo con la ciencia". Interesantísima coincidencia entre el documento de la COP28 y las declaraciones del CEO Chevron citadas en la segunda parte de este trabajo.

Resulta interesante constatar como la discusión alrededor de la transición energética está reflejando en cierta medida las cuestiones planteadas en la segunda parte de este trabajo. Se observa, una vez más, la tensión que supone la solución antes mencionada como institucionalista que aboga por el abandono inmediato de los combustibles fósiles y las posturas convergentes de los países productores de petróleo y gas y los grandes jugadores históricos de la industria de la energía. Sin perjuicio de lo anteriormente mencionado podemos afirmar que con diferencias en los horizontes temporales todos los actores implicados vislumbran una matriz energética global basada en la no emisión de carbono de la atmósfera.

Por último y en línea con lo que fue planteado en la conclusión del trabajo, la cuestión de la energía disponible como una limitación al desarrollo y la posibilidad incluso de repensar el desarrollo a partir de los flujos energéticos sigue siendo una cuestión ajena a la discusión global. La luz de alarma sobre el tablero de la civilización actual no se apaga.

La transición energética como un límite al desarrollo en un contexto de globalización e interdependencia

Bibliografía

En busca de un milagro: Los límites de la 'energía neta' y el destino de la sociedad industrial - by Jerry Mander & Richard Heinberg - This is a translation of Searching for a Miracle: 'Net Energy' Limits & the Fate of Industrial Society, a report originally released in September 2009 by the Post Carbon Institute & International Forum on Globalization. Traducción de Carlos Valmaseda.

Vaclav Smil, Energy Transitions: History, Requirements, Prospects, 2010, Praeger Publishers.

Vaclav Smil, Power Density: A Key to Understanding Energy Sources and Use, 2015, The MIT Press.

Vaclav Smil, Energy and Civilization: A History, 2017, The MIT Press.

Joseph Tainter, The Collapse of Complex Societies, 1988, Cambridge University Press.

[Ugo Bardi, Peak oil, 20 years later: Failed prediction or useful insight?, Energy Research & Social Science Volume 48, February 2019, Pages 257-261](#)

[IEA, World Energy Outlook, 2021](#)

[Enciclopedia de Energía Universidad de Calgary, definición de densidad energética](#)

[United Nations Climate Change ¿Qué es el Acuerdo de París?](#)

[EPA Center for Corporate Climate Leadership](#)

<https://www.economist.com/business/can-big-oils-bounce-back-last/21807153>

Climate Change Resilience Report, 2021, Chevron

https://corporate.exxonmobil.com/News/Newsroom/News-releases/2021/1109_Why-we-are-investing-15-billion-in-a-lower-carbon-future

Ute Hasenöhrl, Jan-Henrik Meyer, The Energy Challenge in Historical Perspective, Technology and Culture, Volume 61, Number 1, January 2020, pp. 295-306 (Article), Published by Johns Hopkins University Press

Sieferle, *The Subterranean Forest: Energy Systems and the Industrial Revolution* (2001, The White Horse Press, Página 180, Traducción propia

MISSEMER, Antoine. 2012. "William Stanley Jevons' The Coal Question (1865), beyond the rebound effect". Ecological Economics, vol. 82, p. 97-103.

[<http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolecon.2012.07.010>]

La transición energética como un límite al desarrollo en un contexto de globalización e interdependencia

<https://www.un.org/es/impacto-acad%C3%A9mico/sostenibilidad#:~:text=En%201987%2C%20la%20Comisi%C3%B3n%20Brundtland,mundo%20que%20buscan%20formas%20de>

Earth System Science Data – Global Carbon Budget 2020 – Friedlingstein et al. 2020

<https://www.icos-cp.eu/science-and-impact/global-carbon-budget/2020>

<https://www.icos-cp.eu/science-and-impact/global-carbon-budget/2020>

Only massive innovation will save us from climate or financial disaster / Toronto Star/ 01/31/2022

<https://www.thestar.com/opinion/contributors/2022/01/31/only-massive-innovation-will-save-us-from-climate-or-financial-disaster.html>

<https://concepto.de/leyes-de-la-termodinamica/#ixzz7PUGFuXVh>

<https://datos.enerdata.net/energia-total/datos-consumo-internacional.html>

<https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2021-full-report.pdf>

<https://ourfiniteworld.com/2018/04/04/why-the-standard-model-of-future-energy-supply-doesnt-work/>

<https://ourfiniteworld.com/2018/04/12/energy-return-on-energy-invested-prof-charles-halls-comments/>

<https://www.scientificamerican.com/article/eroi-charles-hall-will-fossil-fuels-maintain-economic-growth/>

Revisiting the Limits to Growth After Peak Oil, Charles Hall & John W. Day Jr., American Scientist, May-June 2009

GUTIÉRREZ GARZA, ESTHELA (2007). De las teorías del desarrollo al desarrollo sustentable. Historia de la construcción de un enfoque multidisciplinario. Trayectorias, IX(25),45-60.[fecha de Consulta 6 de Junio de 2022]. ISSN: 2007-1205. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=60715120006>

IRENA_World_Energy_Transitions_Outlook_2022

<https://www.irena.org/energytransition#:~:text=The%20energy%20transition%20is%20a,emissions%20to%20limit%20climate%20change.>

Net Zero by 2050 A Roadmap for the Global Energy Sector (2021, IEA)

La transición energética como un límite al desarrollo en un contexto de globalización e interdependencia

<https://www.olade.org/wp-content/uploads/2021/06/Situacion-del-consumo-energetico-a-nivel-mundial-y-para-America-Latina-y-el-Caribe-ALC-y-sus-perspectivas.pdf>

<https://www.uab.cat/web?cid=1096481466568&pagename=UABDivulga%2FPage%2FTemplat ePageDetallArticleInvestigar¶m1=1221029663536>

Joseph Tainter on The Dynamics of the Collapse of Human Civilization

<https://www.youtube.com/watch?v=JsT9V3WQiNA>

<https://msuweb.montclair.edu/~lebelp/CobbDouglasProdAER1928.pdf>

<https://www.uv.es/sancho/funcion%20cobb%20douglas.pdf>

PNUD. (1990). Informe sobre Desarrollo Humano 1990. Definición y medición del desarrollo humano

<https://hdr.undp.org/system/files/documents/hdr1990escompletonostatspdf.pdf>

<https://www.un.org/en/climatechange/net-zero-coalition>

<https://ricardopascale.com/wp-content/uploads/2013/09/1989-R-Solow.-Pionero-en-la-Teor%C3%ADa-del-Crecimiento-EI-D%C3%ADa.pdf>

<http://www.piketty.pse.ens.fr/files/Solow1957.pdf>

https://es.wikipedia.org/wiki/Crecimiento_econ%C3%B3mico#cite_note-1 09/18/2022 12:29 PM

<http://www.derecho.uba.ar/publicaciones/lye/revistas/46-3/el-factor-residual-de-crecimiento-economico.pdf>

<https://data.worldbank.org/indicator/NY.GDP.MKTP.CD?locations=AR>

There's a carbon-capture gold rush. Some warn better solutions exist. The Washington Post. By Pranshu Verma Entry on 11/04/2022

<https://www.washingtonpost.com/technology/2022/06/23/carbon-capture-climate-change/>

https://repositoriosdigitales.mincyt.gob.ar/vufind/Record/RIDAA_ed644993446588078ed5bfc73a686e7d

<https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/energy> Metas de ODS 7 surgen de este apartado.

<https://espanol.epa.gov/la-energia-y-el-medioambiente/emisiones-de-dioxido-de-carbono>
Consultado el 03/26/23

La transición energética como un límite al desarrollo en un contexto de globalización e interdependencia

A.A.v.V (2022). "Llegar a las emisiones netas cero: el mundo se compromete a tomar medidas". Naciones Unidas. [online] Disponible en: <https://www.un.org/es/climatechange/net-zero-coalition>. Consultado el 10 de abril de 2023.

CMMAD-Informe-Comision-Brundtland-sobre-Medio-Ambiente-Desarrollo.

https://www.ecominga.uqam.ca/PDF/BIBLIOGRAPHIE/GUIDE_LECTURE_1/CMMAD-Informe-Comision-Brundtland-sobre-Medio-Ambiente-Desarrollo.pdf

[La señal de alerta mundial que envió el CEO de una empresa que trabaja en la Argentina - LA NACION](#) (Ingreso 05/21/2023)

"PERSPECTIVAS MUNDIALES DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES TRANSFORMACIÓN ENERGÉTICA DE AQUÍ A 2050" IRENA 2020

Climate Change 2022 Mitigation of Climate Change – Summary for Policymakers
Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) 2022

New Energy Outlook 2022 – Executive Summary Bloomberg New Energy Finance (BNEF)

Sanahuja, José Antonio. (2021). Pacto Verde Europeo: el giro ambiental de un actor global.
<https://ceipaz.org/anuario2021/>

COMUNICACIÓN DE LA COMISIÓN AL PARLAMENTO EUROPEO, AL CONSEJO EUROPEO, AL CONSEJO, AL COMITÉ ECONÓMICO Y SOCIAL EUROPEO Y AL COMITÉ DE LAS REGIONES, Bruselas 2019, "El Pacto Verde Europeo".

https://archive.ipcc.ch/home_languages_main_spanish.shtml#:~:text=El%20Grupo%20Intergubernamental%20de%20Expertos,repercusiones%20y%20estrategias%20de%20respuesta

[U.S. Energy Information Administration - EIA - Independent Statistics and Analysis](#)

The radical implications of a zero growth economy

Trainer, 2011. in [RWER issue 57: Ted Trainer | Real-World Economics Review Blog \(wordpress.com\)](#)

IRENA (2022), Geopolitics of the Energy Transformation: The Hydrogen Factor, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.

Fondo Monetario Internacional (2022), Finanzas y Desarrollo (Revista), diciembre 2022. LA DÉCADA DEL HIDRÓGENO - THIJS VAN DE GRAAF

<https://www.imf.org/es/Publications/fandd/issues/2022/12/hydrogen-decade-van-de-graaf>

Nuclear Energy Agency -OECD (2022), Meeting Climate Change Targets, The Role of Nuclear Energy.

La transición energética como un límite al desarrollo en un contexto de globalización e interdependencia

TheConversation.com – Five major outcomes from the latest UN climate Summit. Martin Divisek / EPA, Publicado el 14/12/2023.

<https://theconversation.com/five-major-outcomes-from-the-latest-un-climate-summit-219655>