

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE CIENCIAS SOCIALES
LICENCIATURA EN DESARROLLO

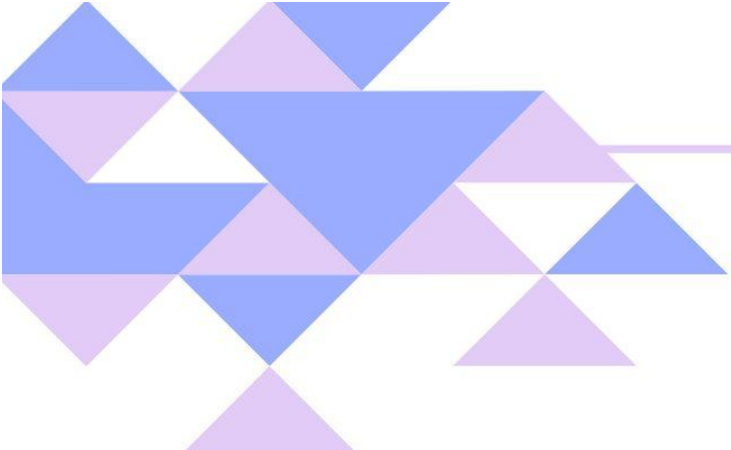
MONOGRAFÍA DE GRADO

Ventana de oportunidad y política industrial verde:
Uruguay frente al desafío del hidrógeno

Jimena Beloso Escardó

Tutor: Reto Bertoni

2025



Jimena Beloso Escardó

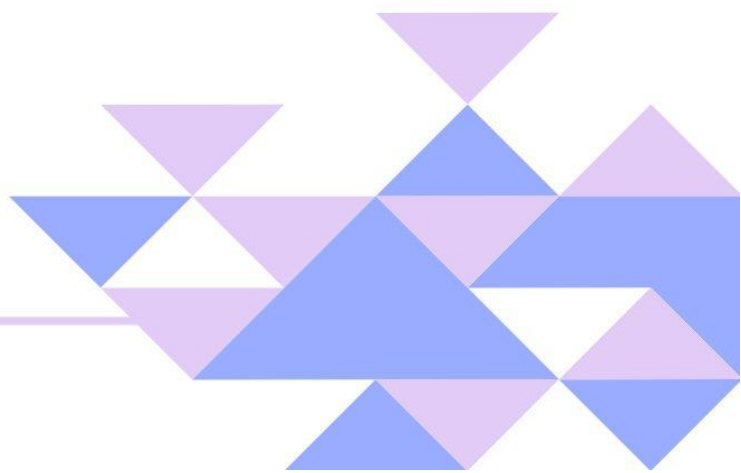
Monografía de grado - Licenciatura en Desarrollo

VENTANA DE OPORTUNIDAD Y POLÍTICA INDUSTRIAL VERDE:

Uruguay frente al desafío del hidrógeno



Agosto 2025
Tutor: Dr. Reto Bertoni
Referente taller: Dr. Javier Taks



Resumen

El hidrógeno verde (HV), producido mediante electrólisis a partir de fuentes renovables, se perfila como un vector clave en la descarbonización global. La configuración aún incierta de sus mercados y el carácter incipiente de las tecnologías asociadas ha generado expectativas en el Sur Global, donde se proyecta como una posible vía para el desarrollo económico y social en clave de sustentabilidad ambiental. En este contexto, Uruguay busca posicionarse en la economía del HV, basándose en sus ventajas naturales y su experiencia en energías renovables, aunque con una estrategia oscilante entre el liderazgo estatal y la primacía del sector privado.

Esta monografía propone abordar el posible rol de Uruguay en los futuros mercados industriales del HV y sus derivados hacia 2040, desde una perspectiva situada en los estudios del desarrollo. A partir del enfoque de Eicke y De Blasio (2022), que clasifica a los países según dotación de recursos y capacidades industriales, se propone una revisión crítica que incorpora marcos teóricos complementarios como trayectorias tecnológicas, capacidades endógenas y cadenas globales de valor.

Desde una metodología cualitativa y exploratoria, se combina análisis bibliográficos, documentos estratégicos y entrevistas a expertos/as. Los resultados indican que, aunque Eicke y De Blasio incluyen a Uruguay como “observador”, esta categoría invisibiliza el potencial transformador de ciertas decisiones de política pública. Las conclusiones destacan que el posicionamiento del país dependerá menos de su estructura y más de su capacidad para articular políticas que integren transición energética, innovación y desarrollo sostenible.

Palabras clave

Hidrógeno verde; Uruguay; desarrollo sostenible; política industrial; capacidades endógenas; cadenas globales de valor; transición energética; innovación.

Tabla de contenido

Lista de siglas y abreviaciones	4
1. Introducción	5
2. Fundamentación o justificación	9
3. Antecedentes	11
3.1 El contexto	11
3.2 Uruguay: el camino recorrido y una nueva era de transformación energética..	12
4. Marco Conceptual	16
4.1 El desarrollo humano sostenible	16
4.2 Cadenas globales de valor	19
4.3 Paradigmas tecnoeconómicos	28
4.4 El planteo de Eicke y De Blasio (2022) y el papel de Uruguay.....	31
5. Problema de Investigación y Objetivos.....	39
6. Abordaje metodológico	40
7. La Hoja de Ruta del Hidrógeno Verde en Uruguay	41
8. Discusión teórica-metodológica con Eicke y De Blasio (2022)	45
8.1 Una aproximación a las capacidades de CTI en Uruguay.....	48
9. Conclusiones	52
10. Referencias bibliográficas	55
11. Anexo	60

Lista de Siglas y Abreviaciones

ANCAP Administración Nacional de Combustible, Alcohol y Portland

BID Banco Interamericano de Desarrollo

CGV Cadenas Globales de Valor

CTI Ciencia, tecnología e innovación

DHS Desarrollo humano sostenible

HV Hidrógeno Verde

IDOS Instituto Alemán para el Desarrollo y la Sostenibilidad

I+D Investigación y Desarrollo

IRENA Agencia Internacional de Energías Renovables (por sus siglas en inglés)

LCR Requisitos de Contenido Local (Local Content Requirements)

MIEM Ministerio de Industria, Energía y Minería

MVOTMA Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente

ODS Objetivos de Desarrollo Sostenible

ONU Naciones Unidas

UNIDO Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial

UTE Administración de Usinas y Transmisiones Eléctricas

1. Introducción

El hidrógeno es el primer elemento de la tabla periódica, el más simple y abundante del universo. Tanto él mismo, como sus derivados, son portadores de energía y un medio para almacenarla, pero dado que raramente existe como gas en la Tierra, debe ser separado de otros elementos. En las últimas décadas, la transición hacia fuentes de energía más sostenibles ha emergido como una prioridad global en respuesta al cambio climático y la necesidad de reducir las emisiones de carbono, lo que ha puesto en marcha un modelo de transformación energética global que tiene grandes implicaciones geopolíticas (IRENA, 2022a). El hidrógeno verde (en adelante HV) emerge como un posible vector energético en ese contexto.

El HV se produce separando agua en hidrógeno y oxígeno, utilizando electricidad obtenida a partir de energías renovables a través de un proceso llamado electrólisis. Su principal atractivo es el potencial para descarbonizar ciertos sectores en donde el uso de la electricidad no tiene una buena relación costo eficiencia, por lo que está llamado a jugar un papel clave como vector energético en el cumplimiento de los objetivos del Acuerdo de París, que procuran mantener el aumento de la temperatura media global por debajo de los 2 °C respecto de los niveles preindustriales, con esfuerzos para limitarlo a 1,5 °C (Naciones Unidas, s.f.). Como contribución a ello, se espera que, para el 2050, el HV constituya el 12% del consumo final de energía en el mundo (IRENA, 2022a). Asimismo, es esperable que el advenimiento de una nueva era en la geopolítica de la energía remodele las relaciones entre los estados y las comunidades. Hay aún mucha incertidumbre sobre cómo se desarrollarán los mercados del HV y sus derivados, quiénes serán los líderes del mercado y cuáles serán estas implicaciones geopolíticas correspondientes. Muchos de estos asuntos dependen de los marcos de política pública que los gobiernos elijan, teniendo en cuenta “las consecuencias sociales y económicas (...), los impactos del cambio climático y la urgencia de acortar la brecha entre los que tienen y los que no” (IRENA, 2022, p. 3).

A pesar de estas incertidumbres, la cantidad de países con hojas de ruta en cuanto al HV se ha triplicado en los últimos dos años, lo cual demuestra que los países están trazando sus estrategias y preparando su entrada a estos mercados de una u otra forma (IRENA &

WTO, 2023). Uruguay, por su parte, comenzó a pensar en el desarrollo del HV a partir de 2018, vinculado a un grupo formado por el Ministerio de Industria, Energía y Minería (MIEM) y las empresas públicas energéticas Administración Nacional de Usinas y Trasmisiones Eléctricas (UTE) y la Administración Nacional de Combustibles, Alcohol y Portland (ANCAP), enfocadas en la producción y uso del HV en transporte pesado y de larga distancia, en el llamado Proyecto Verne y con el respaldo del Banco Interamericano de Desarrollo (BID) (MIEM, 2024, p.15). El proyecto se financió con un préstamo no reembolsable otorgado por dicha institución para la colaboración técnica, que tenía como objetivo la utilización del hidrógeno en movilidad. Concretamente, el proyecto preveía una experiencia con cinco ómnibus y cinco camiones movilizados a través de combustible basado en HV, pero tenía como objetivo introducir al HV como un *energy carrier*, construir un ecosistema piloto de hidrógeno y sus tecnologías asociadas, identificar barreras técnicas, legales y regulatorias, generar capacidades y conocimiento local, así como identificar factores claves para el diseño de una hoja de ruta. En este proyecto el BID desembolsó 200 mil dólares y se preveía la licitación para el 2020, aunque finalmente no se concretó.

Con el cambio de gobierno a principios de 2020, se evidencia un cambio de rumbo en cuanto al rol estatal en torno al HV. Mientras que previamente venía tomando un rol de impulsor a través de empresas públicas como ANCAP y UTE, el nuevo gobierno asumió un rol más de facilitador y orientado al sector privado, lo cual se evidencia en diversas declaraciones del ex Ministro de Industria, Energía y Minería Omar Paganini¹, señalando que “la estrategia está basada en la inversión privada y forma parte del programa interinstitucional H2U” y que “el motor del hidrógeno verde será la inversión privada”, a pesar de que menciona que empresas públicas como UTE y ANCAP también tienen un rol importante a jugar (MIEM, 2023a). En 2024, la también ex ministra de Industria, Energía y Minería, Elisa Facio², cuestionó al expresidente de ANCAP Alejandro Stipanich con respecto al proyecto de la empresa HIF Global, ya que consideraba que “este tipo de inversiones deberían ser exclusivas del sector privado” y decidió descartar la posibilidad de una participación del grupo ANCAP en un porcentaje máximo del 30% del proyecto (*la diaria*, 2024a). En última instancia, esto derivó en la renuncia de dicho jerarca (*la diaria*, 2024b).

¹ Se desempeñó en dicho cargo desde el 1 de marzo de 2020 al 4 de noviembre de 2023.

² Se desempeñó en dicho cargo desde el 6 de noviembre de 2023 al 1 de marzo de 2025.

En definitiva, en 2020, el MIEM asume el liderazgo del proceso y comienza a trabajar con el grupo interinstitucional del hidrógeno, integrado por diferentes ministerios e instituciones estatales. En 2021 se llevó a cabo un estudio de prefactibilidad junto con el puerto de Róterdam (Países Bajos) para identificar el potencial de Uruguay como productor y exportador de hidrógeno verde y sus derivados hacia Europa. El informe sostiene que “los países de América Latina, debido a los recursos naturales que poseen, son firmes candidatos para convertirse en productores de esta alternativa a los combustibles fósiles (...). Además de acelerar la propia transición energética del país, puede ser una vía para la recuperación económica gracias a las posibilidades de exportación” (ICEX, 2021, p. 21)

En 2022, a través de la resolución presidencial 294/022, el gobierno uruguayo establece el Programa H2U, convocando a los organismos públicos relevantes a trabajar en el tema del HV. En mayo de 2023, el Fondo Sectorial del Hidrógeno Verde selecciona un proyecto piloto, el Proyecto Centenario en Durazno, Uruguay para producir hidrógeno y alimentar 17 camiones de carga pesada³.

El 18 de julio de 2023 nuestro país firmó un memorándum de entendimiento⁴ con la Unión Europea, de promoción de las inversiones, investigaciones e infraestructuras para el HV, que plantea al desarrollo del sector como uno de los pilares de la segunda transición energética, relevante para garantizar el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas (MIEM, 2023b). En noviembre del mismo año, el MIEM publicó la “Hoja de Ruta de Hidrógeno Verde y derivados en Uruguay”, un trabajo realizado por el grupo interinstitucional del hidrógeno coordinado por dicho ministerio y conformado por una pluralidad de organismos del Estado, que pone de manifiesto la apuesta del país para consolidar una industria del HV y derivados. En julio de 2024 se publicó una versión final revisada del mismo documento.

En la mencionada Hoja de Ruta, el ex ministro de Industria Omar Paganini señala que el HV representa “una estrategia hacia la prosperidad apoyada en nuestras ventajas competitivas, el impulso a la nueva economía verde como fuente de desarrollo” (MIEM

³ Para más información sobre el Fondo Sectorial del Hidrógeno Verde, ver: <https://www.gub.uy/ministerio-industria-energia-mineria/comunicacion/publicaciones/fondo-sectorial-del-hidrogeno-verde>

⁴ <https://www.gub.uy/ministerio-industria-energia-mineria/comunicacion/noticias/uruguay-ue-firmaron-memorandum-entendimiento-para-cooperar-energias>

2024, p. 7). En esa línea, el MIEM plantea en su página web que Uruguay apuesta a consolidar una industria del HV y derivados cuya estrategia para 2040 podría alcanzar una facturación de 1900 millones de dólares y más de 30.000 empleos de calidad asociados.

Inmersos en este complejo contexto, este trabajo se propone analizar el rol que podría desempeñar Uruguay en los futuros mercados industriales del hidrógeno verde y sus derivados, partiendo del marco analítico propuesto por Eicke y De Blasio (2022) e incorporando enfoques teóricos que permiten pensar de forma más dinámica las posibilidades de inserción productiva del país. En particular, se presta atención a los conceptos de trayectorias tecnológicas, capacidades endógenas y cadenas globales de valor.

Se entenderá “mercado industrial” como aquel espacio en el que se intercambian bienes o servicios a un determinado precio para satisfacer las necesidades de un demandante y crear valor, abarcando a los productores, distribuidores, intermediarios, compradores, instituciones y estados relevantes al intercambio de dichos bienes y servicios. (Hutt & Speh, 2024).

El trabajo se organiza en tres secciones principales. En primer lugar, se aborda el contexto internacional y nacional en torno al hidrógeno verde, con especial atención a las oportunidades industriales vinculadas a sus principales derivados. En segundo lugar, se analiza el planteo de Eicke & De Blasio (2022) sobre la configuración geopolítica de los futuros mercados del hidrógeno, centrado en tres aplicaciones o derivados clave. Por último, se discute ese enfoque desde una perspectiva teórica-conceptual que incorpora los conceptos de trayectorias tecnológicas, capacidades endógenas y cadenas globales de valor, con el objetivo de reflexionar críticamente sobre el posicionamiento posible de Uruguay en un escenario en transformación.

2. Fundamentación o justificación

La emergencia del HV como vector potencial de descarbonización a nivel global, junto con las incertidumbres en torno a la configuración de sus mercados y el carácter aún inmaduro de las tecnologías involucradas en su producción, almacenamiento, transporte y uso, ha generado crecientes expectativas en el Sur Global. En particular, su posible producción en países con abundantes recursos renovables se presenta como una oportunidad para el desarrollo económico y social en clave de sustentabilidad ambiental.

En este marco, analizar y debatir la posible incorporación de Uruguay a la economía del HV adquiere especial relevancia para los estudios del desarrollo, ya que permite reflexionar sobre los vínculos entre transición energética, industrialización y estrategias de inserción internacional. Es en ese contexto que se sitúa este trabajo final de grado.

La elección del tema se justifica también por su creciente visibilidad en el debate público, la literatura académica y los discursos gubernamentales, así como por las controversias y tensiones que suscita en torno a sus promesas y posibles riesgos. La lectura del enfoque desarrollado por Eicke y De Blasio (2022) funcionó como disparador inicial para reflexionar sobre el papel que podría desempeñar Uruguay en los mercados industriales del HV, y a la vez, sobre qué lugar podría ocupar el HV en la estructura productiva nacional. Esta inquietud se vincula con una pregunta de fondo sobre qué tipo de inserción internacional se busca, y bajo qué orientación estratégica se pretende avanzar.

Este cuestionamiento habilita una discusión más amplia sobre las posibles trayectorias que puede seguir un país como Uruguay frente al despliegue de la economía del hidrógeno. En particular, permite contrastar entre modelos centrados en la provisión de recursos primarios y exportación de commodities energéticos, y aquellos orientados al desarrollo de capacidades productivas, tecnológicas e institucionales a lo largo de la cadena de valor. Esta distinción resulta central para evaluar en qué medida el HV puede ser un motor de transformación estructural y generación de valor agregado.

El presente trabajo se justifica por su pertinencia en el campo de los estudios del desarrollo, al abordar un fenómeno actual, complejo y en evolución, desde una perspectiva que articula energía, industria y política pública. Integra herramientas teóricas trabajadas a lo largo de la carrera, como trayectorias tecnológicas, capacidades endógenas

y cadenas globales de valor, y las complementa con evidencia empírica basada en análisis documental y entrevistas a referentes científicos del ámbito local.

Se espera que este enfoque contribuya a enriquecer el debate sobre la transición energética que representa el hidrógeno verde en clave de desarrollo, aportando elementos para reflexionar sobre el tipo de inserción internacional y las orientaciones estratégicas que podrían adoptar países como Uruguay frente a este desafío.

3. Antecedentes

3.1 El contexto

El HV, es decir, aquel producido exclusivamente a partir de energías renovables, está ganando importancia como un potente factor en la transición energética global (IRENA, 2023). Se presenta como una solución viable para descarbonizar sectores en los que la electrificación directa no es técnicamente posible o resulta económicamente ineficiente, como el transporte pesado, la aviación, los fletes marítimos o el almacenamiento energético estacional, ampliando así las posibilidades de aprovechamiento de la energía renovable. (IRENA, 2023).

El HV podría jugar un papel clave para conseguir los objetivos señalados en el Acuerdo de París, es decir, en los esfuerzos de limitar el calentamiento global a 1.5°C, satisfaciendo alrededor de un 14% de la demanda energética final en 2050.

Actualmente, la producción de hidrógeno es intensiva en carbono, y se utiliza para producir, entre otras cosas, fertilizantes u otros químicos, con lo cual “limpiar” el hidrógeno resulta un paso fundamental. La IRENA estima que la capacidad global para producir HV es más de 20 veces superior a la demanda global primaria a 2050, mientras que un cuarto de esta podría ser satisfecha mediante el comercio internacional. El acceso a fuentes de energía renovable abundantes y de alta calidad será un factor crucial en el costo de la producción del HV, con lo cual su potencial de producción, asociado a una alta disponibilidad de energía solar y eólica, está diseminado en el mundo. Dado que el transporte del HV es técnicamente complejo y poco eficiente económicamente, es probable que la comercialización de este se materialice en gran medida en commodities producidas a partir del HV, como amoníaco, metanol, combustibles sintéticos o acero.

Además del comercio de HV y sus derivados, la expansión del HV genera oportunidades en cuanto a las tecnologías y servicios requeridos para su producción, como electrolizadores (que utilizan electricidad para separar el agua en hidrógeno y oxígeno), compresores, tubos y válvulas (IRENA, 2023), generando así nuevas oportunidades de desarrollo de cadenas de valor y también en el área de almacenamiento, transporte y utilización (celdas de hidrógeno, fertilizantes, etc.).

Hasta la fecha, los altos costos de producción del HV han detenido su expansión en contraste con los costos de producción que tiene el hidrógeno basado en combustibles

fósiles. Sin embargo, la IRENA señala dos factores que incidirán en bajar el costo del HV a futuro, que son el descenso en el costo de la electricidad generada a partir de energía renovable y del costo de los electrolizadores. La agencia señala que el costo de la generación de energía renovable está cayendo rápidamente, ya que, en los últimos 12 años, la producción de la energía solar ha caído un 90%, mientras que la de energía eólica ha caído entre un 59% y 69%, y se espera que continúen cayendo a medida que continúen los avances tecnológicos en el área. Lo mismo podría pasar con los electrolizadores, ya que si la demanda de los mismos está en línea con lo requerido para cumplir con los objetivos a 2050 mencionados, “los efectos del *learning by doing* y las economías de escala generarían reducciones sustanciales en su costo” (IRENA, 2022) lo cual podría significar que el HV alcance la competitividad de costos requerida para competir con el hidrógeno basado en combustibles fósiles en regiones con recursos renovables abundantes y de alta calidad, un factor de competitividad muy significativo⁵.

En 2023, más de 30 países ya contaban con una estrategia de hidrógeno con bajo contenido de carbono, y en este contexto se destaca el rol de la IRENA, que en su informe *International trade and green hydrogen: Supporting the global transition to a low-carbon economy* (2023) adopta un enfoque más integral, dejando de centrarse únicamente en el papel de los países como productores y exportadores. En cambio, subraya la importancia de considerar toda la cadena de valor del hidrógeno, especialmente para los países en desarrollo. El documento advierte que será necesario implementar “acciones de política pública estratégica y concertada para aprovechar las oportunidades y navegar de manera efectiva los muchos desafíos que plantea” (IRENA, 2023, p. 12).

3.2 Uruguay: el camino recorrido y una nueva era de transformación energética.

Se entiende por transición energética el proceso de cambio significativo en la matriz energética de un país o región, asociado a la estructura del sistema mismo, a las fuentes de energía que lo alimentan, sus costos (tanto económicos como de otro tipo), los usos o incluso el régimen político económico en el que tiene lugar el suministro y consumo de energía (Linares, 2018).

Desde esta conceptualización, se identifican distintas “eras” de transiciones energéticas en Uruguay. Bertoni y Román plantean que la primera, la llamada era del carbón, inicia

⁵ También podría incidir la I+D asociada a los componentes de los electrolizadores, en particular la sustitución de algunos minerales “raros” y las técnicas de electrólisis.

en la primera década del siglo XX, cuando aumenta el consumo de carbón mineral versus la leña de 1882 a 1915 y termina a mediados de siglo, con el petróleo como principal fuente energética en la era del petróleo, de 1913 a 1980. Luego vendría la era del petróleo y la hidroelectricidad, de 1980 al año 2000 (Bertoni y Roman, 2006).

A mediados de la primera década del siglo actual, el país parecía sumido en una “crisis energética”. Las centrales hidráulicas no eran suficientes para cubrir la demanda de energía eléctrica, principalmente durante años de sequía, por lo que el país dependía fuertemente de las centrales térmicas y, por tanto, del petróleo, con precios disparados en la época, generando problemas en la balanza de pagos de nuestro país (Méndez, 2021). Asimismo, el país acumulaba un déficit de inversiones, y la estrategia de “dejar en manos del sector privado” que había dominado los años 90 no había funcionado, dado que las inversiones no terminaron de llegar. Toda esta situación, sumado al aumento de la demanda de energía generada por el crecimiento de la economía durante los años posteriores a la crisis de 2002, aumentó considerablemente los costos de los energéticos, incrementándose las tarifas y generando problemas a la macroeconomía en general (Méndez, 2021).

A partir de esta situación y en las últimas dos décadas, Uruguay ha llevado a cabo una transformación notable, diversificando su matriz energética, invirtiendo fuertemente en energías renovables como la eólica y solar y convirtiéndose en un referente global en energía renovable. Uruguay garantiza su abastecimiento eléctrico, y también exporta esta energía a los países vecinos, además de que redujo significativamente los costos de generación. De acuerdo con Bertoni y Messina (2023), la transformación energética uruguaya se apoyó en una combinación de políticas públicas sostenidas en el tiempo, incentivos adecuados para la inversión privada y un marco regulatorio e institucional estable, que generó condiciones propicias para la participación del sector privado. Para Ramón Méndez, director nacional de Energía entre 2008 y 2015, la transformación fue posible gracias a un “radical cambio de paradigma con relación a la gobernanza del sector energético, centrado fundamentalmente en una redefinición del rol del Estado y la vinculación entre los diversos actores públicos y privados”, en donde el Estado siempre veló por el control del bien público a tutelar: la energía (Méndez, 2021, p. 438).

En la base de este proceso se identifica un acuerdo multipartidario que adoptó la estrategia energética como una política de Estado, apostando a las fuentes autóctonas y renovables, con un modelo en el que el sector público tuvo un rol de coordinador del sistema y

administrador del esquema de subastas, lo cual fue una garantía y certeza para inversores privados nacionales e internacionales (Uruguay XXI: 2024). Esta importancia de la potestad pública en el manejo de la energía se manifiesta ya desde el plebiscito de 1992 que derrocó artículos claves de la ley e impulsó la privatización de los entes estatales, reforzando a UTE como el sostén público del sistema eléctrico nacional (Fornillo, 2021). UTE monopoliza el conjunto de la transmisión y distribución de la energía eléctrica, así como alrededor del 70% de la potencia instalada. Un punto interesante que plantea el autor es que, en particular luego del 2010, hubo un impulso decidido a las energías alternativas y el poder ejecutivo tomó las riendas del direccionamiento del área, que tradicionalmente estaba impulsado por UTE y ANCAP (Fornillo, 2021). Sin embargo, el proceso no estuvo exento de críticas, en tanto hay voces que plantean que el Poder Ejecutivo, en el afán de no aumentar el endeudamiento de la UTE, garantizó todas las condiciones para el aprovechamiento de las empresas privadas, como el modelo de negocio, ganancia asegurada y financiamiento, perdiéndose parte de la propiedad de la renta de la generación de la energía, lo que se podría ver como una privatización parcial de la generación de esta. (Fornillo, 2021).

Más allá de estas discusiones, el resultado ha sido que, en promedio, las fuentes renovables representaron el 93% de la generación eléctrica entre 2018 y 2022 (53% eólica, solar y biomasa y 40% hidroeléctrica), disminuyendo significativamente las emisiones de gases de efecto invernadero provenientes del sector energético (Uruguay XXI: 2024). A 2023 y en un año de lluvias normales, el 97% de la demanda eléctrica es cubierta por energías renovables mediante una combinación de eólica (32%), biomasa (17%), solar (3%), además de la tradicional hidroeléctrica (45%), lo cual ubica a nuestro país como séptimo país en el mundo con mayor participación de energías renovables variables (como solar y eólica) en su generación eléctrica. Además, el país es líder junto con Dinamarca y Lituania en producción de energía eólica (Uruguay XXI, 2024).

No obstante, en la actualidad se plantea que nuestro país aún tiene espacios de mejora en algunos sectores difíciles de electrificar. Si bien las energías renovables representaron el 56% de la matriz energética total en 2022 (mientras que en 2012 eran solamente 38%), alrededor de un 40% del consumo total de energía primaria corresponde a fuentes fósiles, con alta incidencia del sector transporte e industrial, lo cual genera más de la mitad de las emisiones de dióxido de carbono (Uruguay XXI, 2024).

La apuesta por explorar lo relativo al HV y la definición de una Hoja de Ruta forma parte de una estrategia global para seguir avanzando en este sentido. El foco ha estado en descarbonizar los sectores de transporte e industria, materias primas de uso industrial, sostener la participación de las energías renovables, aumentar la eficiencia del sistema eléctrico y desarrollar una “economía del hidrógeno”.

En este contexto, el uso del agua ha sido un punto de discusión clave en el debate en torno al HV y, en ese sentido, vale la pena retomar algunos puntos clave en torno a la gestión del agua en nuestro país. En 1990 se crea el Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente (MVOTMA), al tiempo que se vivía una década de expansión del neoliberalismo en América Latina, que privilegió la iniciativa privada. En Uruguay, el proceso de privatización del suministro de agua potable fue muy limitado (al departamento de Maldonado) y sus malos resultados (en términos de costos y cobertura) propiciaron el plebiscito del 2004, en donde se decidió afirmativamente por el manejo público e integrado de los recursos hídricos en nuestro país (Mazzeo et al., 2021).

En 2009 se avanzó en la implementación de la Política Nacional de Aguas, surgiendo las comisiones de cuenca y consejos regionales del agua y durante la segunda presidencia del Dr. Tabaré Vázquez (2015 a 2020) se dio un nuevo impulso para avanzar en la gestión integrada del agua a través del Plan Nacional de Aguas, Plan Nacional Ambiental y la creación del Sistema Nacional de Respuesta al Cambio Climático y la Variabilidad Climática (SNRCC).

Los debates en torno al uso del agua han evidenciado que Uruguay necesita transitar hacia modelos más avanzados y robustos de gobernanza del agua que vayan más allá del manejo integrado y supongan un manejo adaptativo o comanejado entre los distintos actores o agentes. Por otra parte, mencionan que el país no tiene visiones compartidas sobre la gestión del agua, incluso dentro de los distintos partidos políticos. Por último, el país debería fortalecer su sistema de monitoreo de los recursos acuáticos incorporando información de calidad y cantidad del agua. Un tema clave en este sentido ha rodeado los debates sobre el HV, en donde la falta de información acerca de los recursos hídricos, en particular en los acuíferos, genera múltiples incertidumbres (Mazzeo et al., 2021).

4. Marco conceptual

4.1 El desarrollo humano sostenible

El concepto de “desarrollo” ha sido objeto de debate y evolución desde su surgimiento, transitando por distintas fases de conceptualización. En sus primeras formulaciones, durante la posguerra y el proceso de descolonización, el desarrollo fue entendido mayormente como un proceso lineal de crecimiento económico que tenía como objetivo aproximar a los países del Sur Global a los estándares de los países industrializados del Norte. Este enfoque se basaba en la idea de *catch-up*, es decir, en la posibilidad de que los países subdesarrollados pudieran alcanzar a las economías más avanzadas mediante la implementación de políticas que promovieran el crecimiento material, la expansión de la producción y el aumento del bienestar colectivo.

Sin embargo, la discusión académica actual ya no le adjudica una definición estricta, sino que es entendido como un concepto normativo y cambiante. La idea de desarrollo se ha convertido en un espacio de reflexión y disputa que recoge una pluralidad de enfoques, que consideran no solo el crecimiento económico, sino también la justicia social, el bienestar humano y la sostenibilidad ambiental.

Actualmente, la discusión en torno al desarrollo parece centrarse en la falta de sostenibilidad y sustentabilidad del modelo existente, señalando su incapacidad estructural para resolver las inequidades sociales y evitar graves impactos ambientales como consecuencia de la sobreexplotación de los recursos naturales. Se han planteado distintas alternativas superadoras, algunas que cuestionan la necesidad misma del crecimiento económico, otras que hablan más bien de crear un espacio ambientalmente seguro y socialmente justo y otras centradas en las prácticas y procesos de producción y patrones de consumo de las personas (Bortagaray & Stuhldreher, en Sutz & Bortagaray, 2024). El planteo del decrecimiento aparece entonces como una solución posible para alcanzar la sustentabilidad, mejorando el bienestar humano y reduciendo la importancia del crecimiento económico para alcanzar este objetivo (Bilancini & D'Alessandro, 2012, como se citó en Bortagaray & Stuhldreher, 2024). Sin embargo, este enfoque perdió fuerza ante la preeminencia del enfoque del desarrollo humano sostenible (DHS) a partir de los años 90.

El enfoque del desarrollo humano se plantea como un paradigma superador que engloba los desafíos planteados, al identificar a las personas como la razón de ser del desarrollo, como beneficiarios y agentes de un desarrollo humano equitativo y de largo plazo, individual y colectivo (Sen, 1999). Asimismo, este paradigma se articula con los postulados del Informe Brundtland (Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo, 1987) al destacar la necesidad de que el desarrollo contemple de forma integrada las dimensiones económica, social y ambiental, con una visión de compromiso y responsabilidad intergeneracional global (Bortagaray & Stuhldreher, en Sutz & Bortagaray, 2024).

De esta manera, la noción del desarrollo humano sostenible (DHS) aparece como una noción general orientadora del desarrollo en la actualidad, definido como:

“el propósito de expandir en el presente y en el futuro las libertades y capacidades individuales y colectivas de la gente para, en perspectivas igualitarias y solidarias, vivir vidas que tenga motivos para considerar valiosas, bajo formas que tiendan a proteger el ambiente y a mejorarlo, en el entendido de que todo ello implica considerar a las personas no como pacientes, sino como agentes dotados de razón y conciencia” (Arocena, en Sutz & Bortagaray, 2024, p. 35).

Esta noción hace énfasis en que “por razones éticas y también pragmáticas, insustentabilidad y desigualdad deben ser encaradas en conjunto” (Arocena, en Sutz & Bortagaray, 2024: 17).

En este contexto, resulta claro considerar por qué los vínculos entre el desarrollo y la energía son profundos y variados. Desde una perspectiva más funcional, la energía es esencial para el funcionamiento de casi todas las actividades productivas, en especial para la industria, agricultura y transporte. Asimismo, el acceso a la energía es considerado como un derecho humano, ya que se vincula con la capacidad de las personas de satisfacer sus necesidades básicas y mejorar sus condiciones de vida. En el marco de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de Naciones Unidas (ONU), el acceso a la energía asequible, fiable, sostenible y moderna es el ODS número 7 y es uno de los pilares del desarrollo humano, aunque es importante señalar que el mismo está condicionado por la sostenibilidad ambiental.

Los países en desarrollo se encuentran ante una paradoja significativa en su camino de buscar trayectorias de crecimiento económico acelerado para incrementar el ingreso y

superar inequidades económicas y sociales (Bertoni & Roman, 2006). Por una parte, la región enfrenta el desafío de acelerar el crecimiento y reducir las brechas de productividad e ingresos con el mundo desarrollado, mientras mejora la calidad de vida de sus ciudadanos, asegurando el acceso a bienes y servicios básicos. Por otro lado, la estructura productiva basada en ventajas comparativas estáticas inclina las actividades económicas hacia la explotación de recursos naturales y sectores intensivos en energía (en especial, energías fósiles), agua y materiales (CEPAL, 2021, como se citó en Arocena, 2024, p. 31). Arocena a su vez menciona que la condición periférica de la región nos impulsa al extractivismo por las escasas oportunidades para trabajo digno que muchas veces han generado las “zonas de sacrificio medioambiental” (Arocena, en Sutz & Bortagaray, 2024).

Las energías fósiles han posibilitado una rápida expansión de la producción y del consumo que se reflejó en un crecimiento espectacular de la economía y en variables asociadas, como la población, el consumo per cápita, el flujo de materiales, así como también las emisiones al medio ambiente. En este contexto, es de esperar que, a más riqueza, más gasto de energía, por lo que, considerando los problemas ambientales y el carácter no renovable de las energías fósiles, la perspectiva futura sería el colapso del sistema o la búsqueda de alternativas al “régimen de energía fósil” (Bertoni & Roman, 2006, p. 21).

Considerando los aspectos mencionados anteriormente, resulta fundamental replantear la cuestión del desarrollo, tanto a nivel global como, de manera particular, en América Latina. Esto debe entenderse bajo dos premisas clave: en primer lugar, que el desarrollo forma parte de un conjunto de procesos destinados a mejorar tanto la calidad material como espiritual de la vida humana; y, en segundo lugar, que debe centrarse en la búsqueda de estrategias que favorezcan transformaciones profundas, a través de la integración de enfoques teóricos y prácticas concretas. Dichas transformaciones deben combinar estrategias generales con políticas sectoriales específicas, de manera que se articulen esfuerzos que busquen mejorar de manera integral diversas dimensiones de la calidad de vida (Arocena, en Sutz & Bortagaray, 2024).

En el marco del paradigma del desarrollo sustentable, la ciencia, la tecnología y la innovación (CTI) se consideran elementos fundamentales para la construcción de nuevos modelos de desarrollo. Su relevancia ha sido destacada, por ejemplo, en la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible. Sin embargo, para que las CTI puedan efectivamente actuar

como motores de transformaciones inclusivas y sostenibles, es necesario implementar políticas que sean deliberadas, abarcativas y rigurosas (Bianchi et al., 2021, en Bortagaray & Stuhldreher, 2024).

La tensión entre los modelos productivistas y los modelos conservacionistas ha sido especialmente relevante al abordar la problemática ambiental en Uruguay. En este contexto, se subraya la importancia de superar un desafío sociopolítico complejo: acordar un modelo de desarrollo sostenible que resuelva la tensión entre estos modelos opuestos, aún sin alternativas superadoras y compartidas.

Por tanto, la transformación de la producción para alcanzar la sostenibilidad ambiental debe ir de la mano de un enfoque socialmente sostenible. En primer lugar, resulta injustificable proteger el ambiente mediante estrategias que afecten de manera desproporcionada a los sectores más marginados y que desatienden sus reivindicaciones más urgentes. En segundo lugar, esa opción resulta políticamente inviable en contextos democráticos, ya que las reacciones de los afectados podrían erosionar el apoyo a los gobiernos que implementen tales políticas. Este es uno de los motivos por los cuales, en muchos contextos, los gobiernos tienden a priorizar los modelos productivistas predominantes sobre la protección ambiental y climática, ante la tensión decisiva entre estas opciones (Arocena, en Sutz & Bortagaray, 2024).

4.2 Cadenas globales de valor

Una cadena de valor describe la multiplicidad de actividades que llevan a cabo las empresas y trabajadores para elaborar un producto desde su concepción hasta su uso final, incluyendo actividades como la investigación y el desarrollo (I+D), diseño, producción, mercadeo, distribución y soporte del consumidor final.

En un contexto globalizado, las empresas se especializan en distintos eslabones de la cadena en búsqueda de ventajas competitivas, con lo que la economía global se estructura alrededor de redes de empresas que conforman cadenas globales de valor (CGV) que concentran cada vez un mayor porcentaje del comercio internacional, producto bruto interno y empleo global (Gereffi & Fernandez-Stark, 2016). Esencialmente, el enfoque de CGV explica cómo las empresas, países y regiones se integran en redes de producción globales a través de actividades interconectadas entre sí, para luego estudiar las relaciones

de poder entre los distintos actores de la cadena, a saber, productores, distribuidores, minoristas y consumidores y cómo interactúan estos actores en los mercados globalizados.

Se ha señalado que, para muchos países, especialmente aquellos de bajos ingresos, “la capacidad de insertarse efectivamente en CGV es una condición vital para el desarrollo” (Gereffi & Fernandez-Stark, 2016, p. 4). No se trata sólo de participar o no en la economía global, si no de cómo hacerlo de una manera que logre “capturar las ganancias” en términos de desarrollo económico nacional y construcción de capacidades para reducir el desempleo y la pobreza.

Para realizar dicho análisis, se desarrolla una metodología de CGV, que tiene como objetivo delinear los patrones de producción global, actividades y actores geográficamente dispersos dentro de una industria, y determinar los roles que juegan en países desarrollados y “en desarrollo”.

Al enfocarse en las secuencias de actividades de tareas que agregan valor tangibles e intangibles, desde la concepción y producción hasta el uso final, el análisis en cadenas globales de valor brindan una visión holística de las industrias globales -tanto desde arriba hacia abajo (por ejemplo, examinando cómo las firmas líderes “gobiernan” a escala global sus redes de afiliados y proveedores) y desde abajo hacia arriba (por ejemplo, preguntando cómo esas decisiones de negocios afectan la trayectoria económica y social “hacia la mejora (*upgrading*)” o “hacia el deterioro (*downgrading*)” en países y regiones específicas (Gereffi & Fernandez-Stark, 2016, p. 5).

La metodología explora seis dimensiones que se dividen en *globales*, que se refieren a los elementos internacionales determinados por las dinámicas de la industria a nivel global, mientras que los elementos *locales* refieren a cómo los países individualmente participan en las CGV.

Entre las dimensiones globales, la primera es la estructura entrada-salida, que describe el proceso de transformación de materias primas en productos finales. Basándose en el conocimiento general de la industria, se identifican segmentos de la cadena y se pueden diferenciar según el valor que le agregan al producto o servicio.

El alcance geográfico explica cómo la industria está dispersa globalmente, y en qué países se llevan a cabo las diferentes actividades de la CGV apalancadas en sus ventajas competitivas, en base a un análisis de oferta y demanda global. Generalmente, los países

en desarrollo “ofrecen trabajo de bajo costo y materias primas, mientras que las naciones ricas con talentos altamente educados están detrás de la investigación y desarrollo y el diseño de productos” (Gereffi & Fernandez-Stark, 2016, p. 8).

Por último, la gobernanza refiere a cómo la cadena de valor está controlada por firmas líderes y cómo se organizan las industrias internacionales cuando ciertos actores tienen más poder que otros. Gereffi (1994, como se citó en Gereffi & Fernandez-Stark, 2016, p. 9) define la gobernanza como “la relación de autoridad y poder que determina cómo se asignan recursos financieros, materiales y humanos y fluyen dentro de una cadena.” Inicialmente, en el marco de las cadenas globales de insumos básicos (*commodities*), la gobernanza fue descrita ampliamente en términos de cadenas “manejadas por el comprador” o “manejadas por el productor” (Gereffi, 1994, como se citó en Gereffi & Fernandez-Stark, 2016, p. 9).

En cuanto a las dimensiones locales, encontramos a la mejora, o *upgrading*, que “describe el movimiento dinámico dentro de la cadena de valor examinada, esto es, cómo los productores cambian entre diferentes etapas de la cadena” (Gereffi & Fernandez-Stark, 2016, p. 5). De acuerdo con los autores, es un aspecto clave porque se enfoca en las estrategias usadas por países, regiones y otras partes interesadas para mejorar sus posiciones en la economía global “moviéndose a actividades de mayor valor agregado en las CGVs para aumentar los beneficios resultantes de participar en la producción global” (Gereffi & Fernandez-Stark, 2016, p. 11). Hay multiplicidad de tipos de mejoras, tales como a mejora de procesos, mejoras de productos o aumentar su sofisticación, mejoras funcionales o mejoras en la cadena en la que las firmas se mueven hacia nuevas industrias, que pueden estar relacionadas. Asimismo, también están las mejoras “hacia atrás” donde firmas locales empiezan a suministrar servicios o productos a empresas ubicadas en el país, ya insertas en otra CGV, o mejoras “al mercado final”, que puede incluir moverse hacia mercados con distintas normas o regulaciones más rigurosas y requieran mayor escala en la producción u ofrezcan un mejor precio (Gereffi & Fernandez-Stark, 2016). Por tanto, el desafío de mejora económica en las CGV es identificar las condiciones bajo las cuales países y firmas en desarrollo puedan “escalar la cadena de valor” desde actividades básicas de ensamblado usando mano de obra de bajo costo y calificaciones a formas más avanzadas de suministro de paquete completo y manufactura integrada. Los países desarrollados habitualmente tienen una presencia en las actividades de alto valor

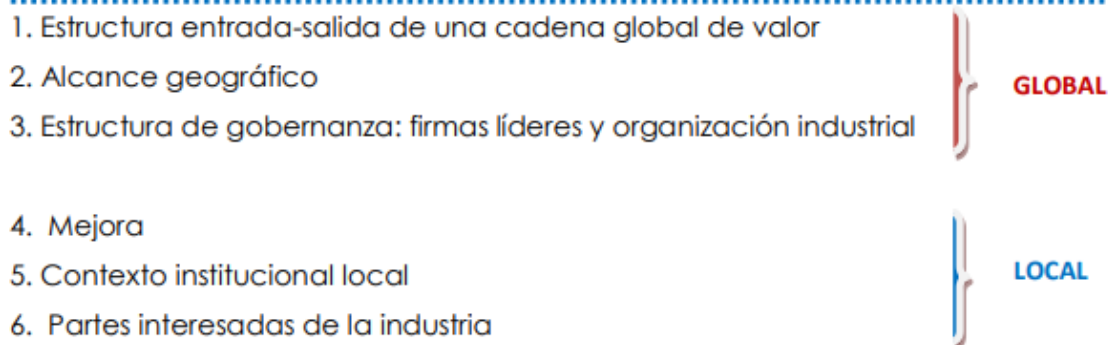
agregado, mientras que los países en desarrollo se concentran en actividades de menor valor agregado (Gereffi & Fernandez-Stark, 2016).

El contexto institucional local refiere a cómo la cadena está embebida de elementos económicos y sociales locales por lo que llama a identificar cómo las condiciones políticas locales, nacionales e internacionales transforman a la participación de un país en cada etapa de la CGV. Ejemplos de condiciones económicas incluyen variables clave como el costo de mano de obra y su nivel de habilidades, infraestructura disponible y acceso a otros recursos como financiación y las instituciones, tales como regulaciones impositivas y laborales, subsidios y política de innovación (Gereffi & Fernandez-Stark, 2016).

Por último, el análisis de las partes interesadas o stakeholders de la industria describe cómo los distintos actores locales (compañías, asociaciones de industria, trabajadores, instituciones educativas, agencias gubernamentales, etc.) interactúan para generar mejoras industriales.

Originalmente el análisis en CGV se limitaba a investigar sobre la competitividad en industrias manufacturera, pero hoy en día, “este análisis se ha expandido en varias direcciones para abarcar industrias emergentes, informar sobre política industrial, orientar a oportunidades para insertar pequeñas y medianas empresas en las cadenas globales y regionales de valor, y atender a los vínculos entre mejora social y económica tales como el desarrollo de la fuerza de trabajo” (Gereffi & Fernandez-Stark, 2016, p. 15).

Figura 1. Seis dimensiones del análisis en cadenas globales de valor



Fuente: Fernandez – Stark, Bamber and Gereffi, 2003

Fuente: Fernandez-Stark, Bamber & Gereffi como se citó en (Gereffi & Fernandez-Stark, 2016, p.6).

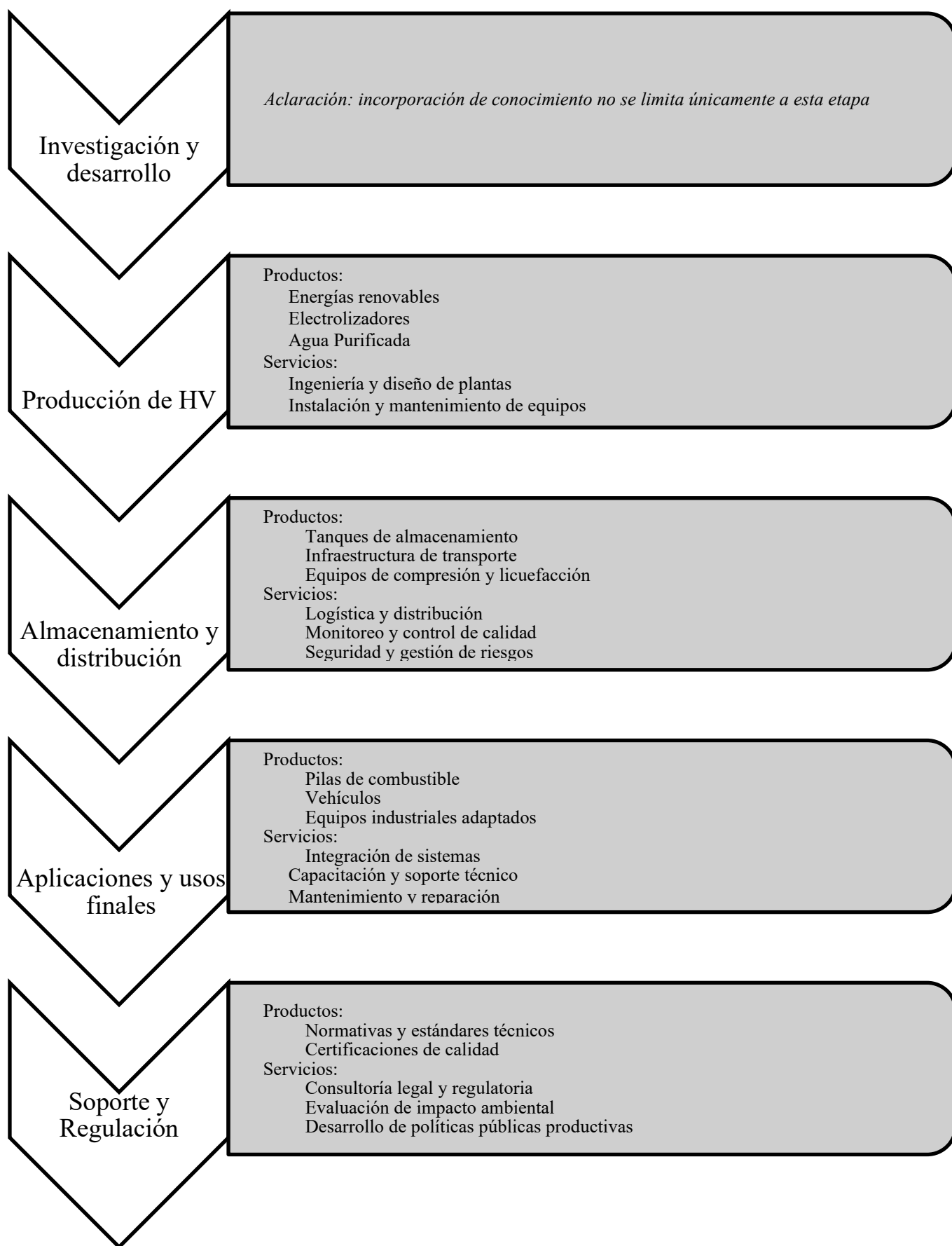
Los autores destacan que la participación en las cadenas globales de valor es crucial para el crecimiento económico, especialmente en países en desarrollo, debido a la creación de empleo, ingreso de divisas, reducción de la pobreza y acceso a la economía global del conocimiento. En las últimas décadas, la integración de productores locales en estas cadenas ha impulsado el comercio en muchos países en desarrollo, alimentando mercados de altos ingresos y siendo lideradas por empresas de economías avanzadas. Sin embargo, el estancamiento de las economías del Norte y el crecimiento de China e India han reconfigurado los impulsores del comercio, afectando la demanda global y las estructuras de producción e innovación. En algunos casos, esto ha obligado a los países en desarrollo a vender productos finales a precios más bajos y con menor procesamiento, empeorando su posición en la economía global (Kaplinsky & Farooki, 2011 en Gereffi & Fernandez-Stark, 2016). Estos cambios suponen un cambio de gravedad en el crecimiento económico, con implicaciones significativas para las CGV, el empleo y la innovación. Si bien los beneficios de la globalización seguirán siendo desiguales, la inclusión de economías emergentes como China, India, Brasil y México representa un cambio cualitativo, aunque no necesariamente mejora las oportunidades para países más pequeños sin políticas adecuadas para fortalecer su desarrollo (Gereffi & Fernandez-Stark, 2016).

En lo que concierne al HV en concreto, la IRENA señala que tiene un gran potencial transformativo para los países en desarrollo, que en general cuentan con vastas fuentes de energía renovable. Si bien se lo considera como un impulsor de procesos de industrialización bajos en carbono y de creación de empleos, “la materialización de estos beneficios económicos depende de factores como capacidad industrial existente y accesibilidad a la tecnología” (IRENA, 2023, p. 12).

La Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial (UNIDO), junto con IRENA y el Instituto Alemán para el Desarrollo y la Sostenibilidad (IDOS), elaboraron un informe titulado *Green hydrogen for sustainable industrial development: A policy toolkit for developing countries* (2023), que desplaza el foco del rol de productores y exportadores para subrayar la importancia de la cadena de valor del hidrógeno en los países en desarrollo. El documento destaca que será necesario implementar acciones de política pública estratégicas y coordinadas para aprovechar las oportunidades y enfrentar eficazmente los múltiples desafíos que plantea (UNIDO, IRENA, & IDOS, 2023, p. 12).

La gráfica debajo es una ilustración simplificada de la cadena de valor del HV, desde la producción de energía renovable, transformación y transporte hasta el uso final y sus posibles aplicaciones. Su adopción es un bloque fundamental en la transición energética en distintos niveles, ya que, en primer lugar, puede ser comercializado como un gas, en tanques o mediante tubos de gas o como un líquido (en barcos). En segundo lugar, están los derivados químicos, como el metanol, amoníaco, metanol y e-jet fuel. Por último, también puede permitir la comercialización de otras commodities bajas en carbono como el hierro metálico. Esto tendrá implicancias en los productos y servicios requeridos a través de la cadena de valor.

Tabla 1. Cadena de valor simplificada del hidrógeno verde y bienes y servicios asociados



Elaboración propia en base a (UNIDO, IRENA, & IDOS, 2023)

Cabe destacar que la generación e incorporación de conocimiento no se limita exclusivamente a la etapa de investigación y desarrollo (I+D) ni a innovaciones radicales. Existen múltiples puntos a lo largo de la cadena de valor donde pueden surgir oportunidades para introducir innovaciones incrementales, ya sea en productos, procesos o formas organizativas.

En el citado trabajo, se identifican oportunidades importantes en varios puntos de la cadena, pero señalan al amoníaco y al metanol como los derivados más importantes, así como a los electrolizadores como una tecnología clave en la cadena de valor. El amoníaco, producido combinando hidrógeno y nitrógeno del aire, se usa en fertilizantes y en diversas industrias. También actúa como portador de energía para el hidrógeno, con ventajas en almacenamiento y transporte. Se espera que el amoníaco verde sea clave en la energía renovable global y podría convertirse en el principal commodity para transportar energía renovable entre continentes (UNIDO, IRENA, & IDOS, 2023). En 2021, India fue el principal destino, y los mayores proveedores fueron Trinidad y Tobago, Rusia, e Indonesia.

El metanol, producto clave en la industria química, puede producirse a partir de dióxido de carbono e hidrógeno verde y ayudar a descarbonizar sectores como el transporte marítimo. China es el principal importador, seguido de India y Estados Unidos. Los mayores proveedores son productores de gas natural como Trinidad y Tobago y Arabia Saudita.

Por otra parte, la electrólisis, es decir, el proceso en el que un electrolizador utiliza electricidad renovable para separar agua en hidrógeno y oxígeno es un proceso clave. Actualmente, los electrolizadores son entre el 30% y el 40% del costo final de la producción del hidrógeno, generando posibilidades de economías de escala en la producción o mejora de los electrolizadores, lo cual será muy importante para alcanzar competitividad en los costos (UNIDO, IRENA, & IDOS, 2023).

El informe destaca 7 *clusters* de actividad económica que presentan oportunidades económicas a lo largo de la cadena:

1. Generación de energía renovable y electrólisis
2. Power to X: (PTX) Conversión del hidrógeno a productos ecológicos sostenibles (“X”)
3. Exportación de HV y PTX

4. Fabricación de equipamiento para la energía renovable
5. Descarbonización de industrias domésticas
6. Descarbonización del transporte
7. Atracción de Inversión Extranjera Directa (IED) en industrias intensivas en energía *renewables pull*⁶.

Mediante la combinación de actividades tanto *upstream* (actividades que se realizan al comienzo del proceso y requieren de materia prima o recursos naturales, en este caso, la generación de energía renovable y electrólisis, así como la fabricación de equipamiento) como *downstream* (el resto de las actividades) los países pueden “promover formas de empleo más sostenibles, agregar valor a largo plazo, mejorar su competitividad y mitigar los riesgos asociados a la participación en el comercio internacional de HV” (UNIDO, IRENA, & IDOS, 2023, p. 29).

Un punto importante es que los autores señalan que las oportunidades en los sectores ya mencionados pueden aprovecharse simultáneamente para agregar valor y para mitigar impactos socioeconómicos a lo largo de la cadena. Por ejemplo, los proyectos de exportación a gran escala mejorarán la balanza de pago, pero pueden no estimular las capacidades industriales como aquellos proyectos que se enfocan en la descarbonización industrial o proyectos de I+D en nuevas tecnologías del HV. Por tanto, el que estas oportunidades se concreten realmente depende de la disponibilidad de recursos naturales, el entorno político e institucional, niveles actuales de tecnología y el entorno social y económico. (UNIDO, IRENA, & IDOS, 2023).

El desarrollo de la cadena de valor del HV se apalanca en factores como el conocimiento tecnológico, disponibilidad de recursos ambientales, un entorno de negocios amigable y trayectorias de desarrollo industrial pasadas. Así, la coordinación de política pública efectiva jugará un rol crucial en generar las bases para el desarrollo de una cadena de valor robusta y adaptada al contexto local (UNIDO, IRENA, & IDOS, 2023, p.13). Para esto, se deberán priorizar estrategias de diversificación industrial, incentivando industrias nuevas y existentes para que desarrollen “productos verdes” y se maximicen los beneficios de la producción de HV, lo cual permitiría la creación de más oportunidades

⁶ El efecto *renewables pull* describe el proceso por el cual se puede producir una reubicación de la producción industrial debido a bajos costos en la producción de energía renovable por disponibilidad de recursos naturales como sol, viento, etc.

laborales y de agregación de valor más allá de la exportación. Este enfoque se orienta a prevenir la formación de enclaves energéticos basados en la exportación y favorece un desarrollo más justo del sector.

El documento menciona también la importancia de adoptar un enfoque que sea dual, integrado, gradual y en fases, es decir, que priorice el uso local versus el exportador, que alinee la propuesta de transición justa con otros objetivos nacionales de manera integrada, ir de proyectos pequeños a otros de mayor tamaño y que se implementen secuencialmente la producción de HV con la de sus aplicaciones industriales. En este contexto la adopción de una estrategia nacional coherente que se enfoque en escalar la producción a través de actividades en toda la cadena de valor es un paso clave para guiar de manera clara a la política pública, los inversores y los encargados de desarrollar los proyectos y solo será posible con un marco regulatorio acorde. (UNIDO, IRENA, & IDOS, 2023).

Asimismo, el acceso a la tecnología juega un rol crucial en la producción de HV, ya que las principales tecnologías empleadas como paneles solares PV, turbinas de viento y electrolizadores se fabrican predominantemente en algunos países industrializados. Una opción que plantea el documento es implementar requisitos de contenido local (LCRs) para impulsar inversiones productivas locales y avance tecnológico (UNIDO, IRENA, & IDOS, 2023).

Otra opción es estimular la demanda gubernamental de productos verdes como el “acero verde” en licitaciones y obras de infraestructura gubernamentales para impulsar la demanda para apoyar a los productores, a la par de subsidios públicos (UNIDO, IRENA, & IDOS, 2023).

Teniendo esto en cuenta, el marco de las CVG proporciona una perspectiva clave para entender cómo las economías se integran en el sistema global y cómo esta integración afecta sus perspectivas y oportunidades de desarrollo.

4.3 Paradigmas tecnoeconómicos

Carlota Pérez, economista venezolana especializada en la relación entre innovación tecnológica y desarrollo económico, destaca en su trabajo el vínculo crucial entre cadenas de valor productivas y el desarrollo económico en el contexto de los ciclos tecnológicos. Su enfoque está basado en el análisis de cómo las revoluciones tecnológicas (como la informática o las energías renovables) afectan la estructura de las economías y sus

oportunidades de desarrollo, dado que transforman las cadenas de valor productivas. La autora entiende “revolución tecnológica”, como “un conjunto interrelacionado de saltos tecnológicos radicales que conforman una gran constelación de tecnologías independientes” (Perez, 2010, p. 138), por lo que se entiende que la expansión del HV podría proporcionar este *bigbang* que abre una nueva oportunidad para generar innovaciones. Además, una revolución tecnológica debe tener “dos rasgos básicos, la fuerte interconexión e interdependencia de los sistemas participantes en cuanto a sus tecnologías y mercados y su capacidad para transformar profundamente el resto de la economía y, eventualmente, la sociedad (Perez, 2010). De acuerdo con la autora, la capacidad de una revolución tecnológica para transformar otras industrias y actividades resulta de la influencia de su paradigma tecnoeconómico, es decir, del modelo de prácticas óptimas para utilizar de manera efectiva estas nuevas tecnologías tanto en las industrias nuevas como en las anteriores, lo cual probablemente resulte en el aumento de su productividad, generando un nuevo potencial de creación de riqueza en la economía (Perez, 2010). El “proceso de difusión de las revoluciones tecnológicas sucesivas y sus paradigmas tecnoeconómicos, junto con su asimilación por parte de la economía y la sociedad, con los aumentos en la productividad y la expansión resultante, constituyen lo que puede denominarse una gran oleada de desarrollo” (Pérez, 2002, como se citó en Pérez, 2010, pp. 20–21). Puntualmente, la autora menciona que entre los puntapiés de estas oleadas “suele encontrarse un insumo clave barato y común a todas (a veces una fuente de energía, otras un material crucial) y una o más infraestructuras nuevas”, que “cambian la frontera y las condiciones de las redes de transporte, para productos, personas, energía e información, extendiendo su alcance y aumentando su velocidad y confiabilidad, al mismo tiempo que reducen drásticamente su costo” (Pérez, 2010, p. 142).

Sin embargo, “Los estudios de la innovación han mostrado que la introducción del cambio técnico no es azarosa, sino que depende del rumbo previo (*path dependent*) e interactúa con innovaciones agrupadas en sistemas, las cuales, a su vez, se interconectan en revoluciones” (Pérez, 2010, p. 153). Esto evidentemente destaca el gran rol que tiene la política pública, concretamente en este caso la política industrial, para orientar los procesos de desarrollo.

Es de suponer que los mercados del HV, más aún considerando que se encuentran en una etapa incipiente, estén rodeados de nuevas oportunidades de innovación y desarrollo

tecnológico, con lo cual resulta clave identificar estas oportunidades y generar una estrategia que potencie la creación de conocimiento tecnológico e innovaciones relevantes.

Las autoras también ofrecen una reflexión concreta sobre cómo América Latina puede, “apoyándose en sus ventajas históricas en recursos naturales (RRNN) y el aprendizaje realizado durante el período de sustitución de importaciones, aprovechar las nuevas oportunidades tecnológicas y de mercado asociadas a los RRNN, para desarrollar capacidades tecnológicas, y nuevas actividades y productos que estarán en el centro de los nuevos estilos de producción” (Marin & Pérez, 2015, p. 33). No obstante, advierten que estas oportunidades solo podrán ser aprovechadas “a través de innovaciones de política e institucionales significativas que puedan acompañar los nuevos procesos que se están gestando” (Marin & Pérez, 2015, p. 33). Las autoras proponen una estrategia de “tecnologización de los recursos naturales en el contexto del crecimiento verde”, reconociendo los múltiples desafíos que esto implica (Marin & Pérez, 2015).

Un concepto clave es el de considerar a las oportunidades de desarrollo como un blanco móvil (Pérez, 2001 como se citó en Marin & Pérez, 2015, p.36), es decir, que “los procesos de crecimiento o desarrollo se dan cuando una oportunidad tecnológica se conjuga con posibilidades de mercado y capacidades previamente adquiridas, en un contexto de ventajas comparativas estáticas y dinámicas” (Pérez y Marín, 2015, p.37). Notablemente, en las ciencias de la vida y de materiales se están produciendo avances impresionantes en biotecnología, nanotecnología, química del agua y química verde (Pérez y Marín, 2015). Desde aquí plantean la importancia de partir de los principales RRNN de cada país y fortalecer las capacidades ya existentes construyendo a su alrededor una red de innovación ya sea a través del avance en el tradicional procesamiento aguas abajo, agregando direcciones sustentables nuevas; moverse aguas arriba hacia bienes y servicios de capital adecuados a las nuevas direcciones y hacia insumos especiales (biotecnológicos, químicos o naturales) o, por último, innovar en productos especializados para mercados exigentes, ya sea insumos industriales o alimentos, adaptados a los requerimientos de un mundo productivo orientado a la sostenibilidad (Pérez, Marín, & Navas-Alemán, 2013)

En esencia, el potencial para la innovación define el espacio de oportunidad para el crecimiento y para el desarrollo (Pérez, Marín, & Navas-Alemán, 2013). Sin embargo, un asunto clave es que la explotación de RRNN en clave “extractivista” de un *commodity* no

sería la estrategia adecuada, en tanto el potencial se encuentra justamente en la formación de vínculos a lo largo de la cadena de valor tanto de los RRNN en sí como de sus aplicaciones industriales.

Asimismo, y de manera central, se señala que “en términos de los procesos de convergencia en el desarrollo, la posibilidad de que nuevos avances capaces de llevar a la próxima revolución tecnológica puedan ocurrir en esas tecnologías es muy alta y la participación en su desarrollo en estas etapas tempranas podría colocar a los países de América Latina en una buena posición para dar un gran salto adelante cuando esas tecnologías se vuelvan ubicuas, de bajo costo y alto crecimiento” (Pérez, Marín, & Navas-Alemán, 2013).

Por tanto, el *timing* se presenta como un tema decisivo. “Las oportunidades de desarrollo son un “blanco móvil” ya que surgen y se modifican a medida que se despliegan las sucesivas revoluciones tecnológicas en los países avanzados”, lo que lleva a que la autora plantee que “con tecnologías maduras no puede haber saltos en el desarrollo”, dado que llega un punto en el que tienen un potencial mínimo para producir beneficios, enfrentan mercados estancados y casi no les queda campo para mejorar la productividad (Perez, 2001, p. 8).

Aprovechar la etapa incipiente del desarrollo de los mercados industriales de productos derivados del HV parece ser una oportunidad clave en tanto la primera fase de desarrollo de estos productos resulta el punto de ingreso más prometedor (Perez, 2001). Si bien la autora no descarta que la teoría de la dependencia tiene su lugar, plantea que existe la posibilidad de “romper el círculo vicioso del subdesarrollo mediante la adopción de políticas apropiadas”, teniendo un blanco claro basado en las propias ventajas competitivas. (Perez, 2001, p.18).

4.4 El planteo de Eicke y De Blasio y el papel de Uruguay.

En 2022, los autores Laima Eicke y Nicola de Blasio publicaron un estudio con el título *The future of green hydrogen value chains: Geopolitical and market implications in the industrial sector*. El estudio plantea que el HV podría jugar un rol clave en aproximarnos a un futuro libre de carbono para el año 2050 y que se generaría una nueva dinámica geopolítica y de mercado, con nuevas dependencias globales. El objetivo principal de su trabajo es clasificar los posibles roles que pueden jugar distintos países en los futuros mercados industriales del HV basado en tres criterios: la disponibilidad de recursos

naturales, la producción industrial existente y una variable llamada *economic relatedness* o relacionamiento económico, señalando que el potencial para la producción de HV y sus aplicaciones industriales (como amoníaco, metanol y acero) se distribuye de manera desigual, siendo que países como Estados Unidos y China podrían emerger como *frontrunners* o “líderes”, mientras que otros países ricos en recursos naturales como Tailandia y México podrían incorporarse a las cadenas de valor compitiendo con potencias industriales dependientes de importaciones por márgenes de negocio. Estas clasificaciones son importantes en tanto podrían ser una fuente de guía para la definición de estrategias de políticas industriales en torno al HV.

La discusión planteada por los autores se enmarca en un debate en torno a la geopolítica que rodea la transición energética, en la que se plantean fundamentalmente las cuestiones de cómo se afectarán las relaciones internacionales a medida que aumente el uso de energías renovables y qué países se convertirán en ganadores y perdedores, en un contexto de grandes desafíos y oportunidades (Eicke & De Blasio, 2022, p. 2). Asimismo, destacan que gran parte de la literatura se basa en identificar las fortalezas geográficas y las rutas de transporte de los países, por lo que pretenden incorporar un enfoque que vaya más allá de la disponibilidad de recursos naturales y mire los cambios que se generarán en las relaciones internacionales como consecuencia de la adopción del HV y cómo los países podrán afectar dinámicamente las cadenas globales de valor a través del tiempo, generando desarrollos económicos y tecnológicos. No se trata solamente de identificar perdedores y ganadores, si no de brindar una visión más “granular” de los diversos roles que los países pueden adoptar en la economía del HV (Eicke & De Blasio, 2022, p. 3).

El enfoque de las cadenas globales de valor adquiere importancia en este análisis, y los autores plantean que algunos de los segmentos críticos de la misma son los siguientes: la investigación y desarrollo (I+D), la producción del HV, su distribución, las aplicaciones industriales y el uso y consumo final. La literatura de las cadenas globales de valor nos indica que “el valor del producto varía a lo largo de los segmentos de la cadena (...), la extracción de recursos es el segmento con menos margen de ganancia, mientras que las aplicaciones industriales presentan un valor agregado mayor” (Eicke & De Blasio, 2022, p. 3)

Así, los autores plantean que podría resultar beneficioso para los países mejorar su posicionamiento en la cadena global de valor moviéndose de actividades de bajo valor agregado a aquellas de alto valor agregado, estrategia que ha resultado a países del Sur

global en el pasado, especialmente a través de transferencias de tecnología y conocimiento. Los nacientes mercados del HV pueden proporcionar nuevas oportunidades a los países para lograr estos objetivos (Eicke & De Blasio, 2022)

También plantean que otro aspecto importante para la cadena de valor de estos mercados incipientes son los niveles de segmentación o integración de esta. Analizar las cadenas de valor energéticas existentes es clave para identificar cómo los *stakeholders* posicionan sus ofertas adoptando modelos de negocio sostenibles, especializándose en tecnologías críticas para ganar ventajas competitivas o respondiendo a limitaciones regulatorias. Estas decisiones resultan en segmentación o integración. Las cadenas de valor segmentadas implican que los *stakeholders* se especializan en segmentos únicos para ganar una ventaja competitiva singular, mientras que la integración combina diferentes segmentos en una firma o ubicación. La integración suele estar asociada a mayores acumulaciones de valor y de control, creación de empleos, reducción de costos de distribución y reducción de dependencia (Eicke & De Blasio, 2022).

Para realizar su análisis, los autores deciden enfocarse en las tres principales aplicaciones industriales del HV (amoníaco, metanol y producción de acero) dado que son las que generan la mayor demanda de hidrógeno actual basado en combustibles fósiles, con lo cual “tendrán una importancia clave en la definición de las cadenas de valor del HV” (Eicke & De Blasio, 2022, p. 1). Asimismo, utilizan los ya mencionados tres criterios clave: la dotación de recursos naturales, la producción industrial existente y la variable *economic relatedness* o relacionamiento económico (Tabla 2).

Tabla 2. Descripción de los criterios utilizados para la clasificación de países.

Criterio	Dotación de recursos naturales	Producción industrial existente	Relacionamiento económico
Descripción general	1. Disponibilidad de fuentes energéticas (radiación solar, viento y tierra y agua fresca) 2.Demanda energética propia 3.Disponibilidad de infraestructura habilitante	Existencia y madurez actual de mercados de hidrógeno	Dinamismo de las cadenas globales de valor
Importancia	HV se produce a través de la fisión del agua entre hidrógeno y	La existencia y madurez actual de mercados de	La transición global a una economía baja en carbono

	oxígeno, utilizando energía eléctrica.	hidrógeno aumentan el potencial de adopción del HV por el conocimiento aportado, la infraestructura, redes y prácticas de negocio y son una ventaja competitiva.	impactará las cadenas energéticas de valor y el ciclo de producción-consumo, modificando las interacciones entre <i>stakeholders</i> .
Variable	1.Potencial para la producción de energía eléctrica 2.Disponibilidad de agua por habitante 3.Infraestructura global	Tamaño de los mercados existentes de hidrógeno	“Relacionamiento económico”: medida de qué tan probable es que tenga lugar una actividad económica basado en la cantidad de actividades relacionadas en el lugar.
Indicador	1.Combina potencial del viento (NREL 2014) y solar Pietzecker et al (2014) 2.Disponibilidad de agua por habitante 3.Calificación de infraestructura global del World Economic Forum 2019 Índice de Competitividad Global.	Cantidad de producción sectorial de sectores (amoníaco, metanol y acero) <i>Nota: este indicador se puede utilizar para reflejar futura demanda de HV.</i>	Porcentaje de actividades relacionadas en una ubicación particular.
Metodología	Se categoriza al país como “1” si: 1.Potencial para la producción de energía mayor a 1.5 veces del consumo energético primario del país. 2.Recursos hídricos de más de 800 metros cúbicos por habitante 3. Calificación mayor a 4 (de 7) en componente de infraestructura global del World Economic Forum 2019 Índice de Competitividad Global.	Se categoriza al país como “1” si: 1.Participación en mercados globales de amoníaco y acero superan el 1% 2.Participación en exportaciones globales del metanol supera el 1%.	Se categoriza al país como “1” si: 1.Relacionamiento económico del amoníaco, metanol o acero es mayor al promedio global.* <i>*De acuerdo con OEC (2020), promedios son de 0.152 para el amoníaco, 0.134 para el metanol y 0.248 para el acero.</i>

Fuente: Elaboración propia en base a Eicke & de Blasio, 2022.

Con estos tres criterios, los autores clasifican a los países en cuanto a su potencial para incorporarse en las futuras cadenas de valor del HV. Sin embargo, señalan que para que

esto se materialice “hay otros factores involucrados como políticas nacionales e internacionales, las dinámicas financieras y de mercado, las relaciones entre los stakeholders y la dependencia de la trayectoria” (Eicke & de Blasio, 2022, p.5).

En la Tabla 3 se presenta cómo se compone cada uno de los grupos de países, por ejemplo, los líderes o *frontrunners* son países con alta dotación de recursos naturales y producción industrial actual basada en hidrógeno, mientras que los *bystanders* u observadores son aquellos que se encuentran en la situación opuesta, lo cual indicaría que tienen pocas posibilidades de integrarse en las cadenas globales de HV y continuarán importando el producto final.

Tabla 3. Clasificación de los países según criterios de Eicke & de Blasio (2022).

Clasificación	Definición	Recomendaciones de política industrial	Ejemplo de países
1.Frontrunners o líderes: -Dotación de RRNN (+) -Producción Industrial (+) -Relacionamiento económico (+/-)	Liderarán en producción de HV y sus aplicaciones industriales a escala global	Políticas industriales que fomenten el <i>up-scaling</i> del hidrógeno para ganar liderazgo global	Estados Unidos, China.
2.Upgraders o promotores: -Dotación de RRNN (+) -Producción Industrial (-) -Relacionamiento económico (+)	Recursos adecuados para la producción de HV y actividades altamente relacionadas que potencialmente podrían realizar <i>upgrade</i> de su posicionamiento y atraer industrias basadas en HV.	Podrían beneficiarse de <i>partnerships</i> estratégicos con líderes para fomentar transferencias tecnológicas y de conocimiento. Atracción de inversión extranjera a través de reducción del riesgo de mercado, asociaciones público-privadas y <i>joint ventures</i> .	Tailandia, México, España, Turquía, Marruecos
3.Importadores: -Dotación de RRNN (-) -Producción Industrial (+) - Relacionamiento económico (+/-)	Países limitados en cuanto a recursos naturales con una producción basada en hidrógeno	Se beneficiarían de acuerdos estratégicos para asegurarse de <i>supplies</i> de HV seguras y estables. Estimular innovación y creación de conocimiento a través de políticas focalizadas para sostener competitividad y evitar relocalizaciones industriales a líderes o <i>upgraders</i> .	Alemania, Japón, Arabia Saudita, Hungría, Egipto

4.Exportadores: -Dotación de RRNN (+) -Producción Industrial (-) - Relacionamiento económico (-)	Países ricos en recursos, pero con potencial de <i>upgrade</i> limitado	Enfocarse en partnerships con importadores para desarrollar infraestructura habilitadora (<i>enabling</i>) y reducir riesgo de mercado -Desarrollo coordinado de estándares internacionales para la producción del HV para facilitar intercambio a escala global	Chile, Noruega, Namibia, Australia, Emiratos Árabes Unidos, Ecuador.
5. Bystanders u Observadores: Dotación de RRNN (-) Producción Industrial (-) Relacionamiento económico (-)	Países con limitaciones significativas en las tres variables	Deberán evaluar si alguna de estas limitaciones, como la infraestructura o la disponibilidad de agua, podrían ser superadas para integrarse al futuro de las cadenas de valor del HV. Si no lo hacen, continuarán siendo importadores finales de productos industriales.	La mayoría de los países africanos y de América del sur.

Elaboración propia en base a Eicke & de Blasio, 2022.

Como ya fue mencionado, los autores se enfocan en el análisis de las tres principales aplicaciones industriales, el amoníaco, el metanol y la producción de acero, ya que son las principales consumidoras de hidrógeno (demandan el 41% de su oferta global). El amoníaco se utiliza como insumo para procesos químicos como la producción de fertilizantes, sistemas de enfriamiento o explosivos, o como un transportador de hidrógeno de larga distancia. El metanol se utiliza en la industria química y también podría ser exportado, mientras que la producción de acero es un proceso que requiere de altas temperaturas las cuales no son fáciles de conseguir con energía eléctrica (Eicke & de Blasio, 2022).

Un aspecto central por el que los autores se enfocan en las aplicaciones industriales es que, según señala la literatura sobre cadenas globales de valor, el valor final de un producto tiende a incrementarse a medida que avanza en las distintas etapas de fabricación. En este sentido, la extracción de recursos suele ser el segmento menos rentable, mientras que las aplicaciones industriales concentran mayor valor agregado (Eicke & De Blasio, 2022). Al proceso de avanzar hacia eslabones de mayor valor dentro de la cadena se lo conoce como *upgrading* o ascenso industrial.

En la Tabla 1, donde se resumen los criterios e indicadores manejados por los autores, vale la pena destacar que utilizaron un sistema de clasificación binario, asignando “ceros” o “unos” para los distintos criterios. Cada criterio fue categorizado como “uno” si se cumplía en al menos dos de las tres aplicaciones industriales mencionadas. Esencialmente, señalan que los líderes, promotores, exportadores e importadores son quienes darán forma al futuro de la geopolítica del HV más que los observadores, mientras que desde el punto de vista de la cadena industrial los exportadores tienen mucha menor relevancia, ya que se enfocarán en el *trading* del HV como commodity (Eicke & de Blasio, 2022).

Si nos detenemos a evaluar el rol asignado a Uruguay, vemos que nuestro país es categorizado como un observador o *bystander* para las tres aplicaciones industriales tenidas en cuenta. Sin embargo, otros países de la región sí alcanzan otros roles, por ejemplo, a Chile se le atribuye el rol de exportador para el caso del amoníaco, líder para el del metanol y exportador para el del acero, mientras que a Brasil se le asigna el rol de importador para el caso del acero y, a Ecuador, el de exportador para las tres aplicaciones industriales mencionadas. Los autores señalan que sólo un puñado de países como Canadá, China y Estados Unidos tienen el potencial de posicionarse como líderes en al menos dos aplicaciones industriales del HV. Por tanto, se menciona que países que lideran en al menos una aplicación industrial, como España o México, podrían incorporarse a la cadena de valor, pero países con bajo relacionamiento económico como Chile, Noruega o Namibia pueden concentrarse en exportaciones de HV.

En conclusión, “aunque hay oportunidades para países en todas las regiones, los países de América del Sur y África se enfrentan a restricciones que limitan su potencial para jugar un rol activo en las cadenas de valor industriales del HV” (Eicke & De Blasio, 2022, p.11). Dada la distribución desigual del potencial para estas tres aplicaciones industriales del HV, resulta claro que la mayoría de los líderes serán países del Norte Global o países de altos ingresos, mientras que países de ingresos bajos estarán limitados a roles de exportadores o incluso observadores. Por más que se indica que “los países podrán, con el tiempo, afectar dinámicamente a las cadenas de valor globales en base a desarrollos económicos y tecnológicos” también se señala que “la promesa del desarrollo sostenible y la industrialización verde que se asocia a menudo con la transición energética (...)

puede no ser replicable” (Eicke & De Blasio, 2022, p.3 y 16). Esto habla de una “transición desigual, y plantea la necesidad de transferencias tecnológicas y apoyos financieros para propiciar una transición e industrialización verde más justa para todos” (Eicke & De Blasio, 2022, p.16).

5. Problema de investigación y Objetivos.

La emergencia del HV como vector potencial de descarbonización a nivel global, junto con las incertidumbres en torno a la configuración de sus mercados y el carácter aún inmaduro de las tecnologías involucradas en su producción, almacenamiento, transporte y uso, ha generado crecientes expectativas en el Sur Global. En particular, su posible producción en países con abundantes recursos renovables se presenta como una oportunidad para el desarrollo económico y social en clave de sustentabilidad ambiental.

En este marco, discutir sobre la posible incorporación de Uruguay a la economía del HV adquiere especial relevancia para los estudios del desarrollo, ya que permite reflexionar sobre los vínculos entre transición energética, industrialización y estrategias de inserción internacional.

Es en ese contexto que se sitúa este trabajo final de grado.

Objetivo general

Discutir el rol potencial que puede desempeñar Uruguay en los futuros mercados industriales del hidrógeno verde con un horizonte al 2040.

Objetivos específicos

1. Describir y analizar el esquema de clasificación de países desarrollado por Eicke & De Blasio (2022), centrado en las variables de recursos naturales, capacidad industrial existente y relacionamiento económico.
2. Discutir las limitaciones de dicho enfoque a partir de marcos teóricos alternativos que incorporan conceptos como trayectorias tecnológicas, capacidades endógenas y procesos de inserción en cadenas globales de valor.

6. Abordaje metodológico

Este trabajo adopta un enfoque cualitativo de tipo exploratorio y analítico, centrado en el estudio de documentos estratégicos, literatura académica y entrevistas a expertos.

La estrategia metodológica se estructura de la siguiente manera. En primer lugar, se analiza el marco teórico de Eicke & De Blasio (2022), que clasifica a los países en cinco grupos según tres variables: disponibilidad de recursos naturales, capacidades industriales y relacionamiento económico existente. Se examinan las fuentes y criterios utilizados por los autores, con énfasis en su lógica clasificatoria y en la posición asignada a Uruguay como país *bystander*.

En segundo lugar, se realiza una crítica teórico-metodológica de este enfoque, incorporando elementos del marco conceptual revisado en la sección anterior, así como énfasis planteados en la Hoja de Ruta del gobierno uruguayo. Se busca realizar una lectura complementaria y crítica a partir de conceptos desarrollados en el marco teórico del trabajo, como trayectorias tecnológicas, capacidades endógenas e inserción en cadenas globales de valor, que permiten abrir la discusión hacia una mirada más dinámica y situada regionalmente del desarrollo del HV.

El trabajo se basa principalmente en el análisis documental de fuentes primarias (Artículos académicos, Hoja de Ruta y documentos técnicos) y secundarias (literatura académica y de organismos internacionales), junto con el aporte de entrevistas a investigadores e investigadoras del ámbito científico, a fin de complementar el análisis con perspectivas situadas sobre las capacidades reales del país, los principales desafíos estructurales, y las oportunidades de articulación regional.

7. La Hoja de Ruta del Hidrógeno Verde en Uruguay

En noviembre de 2023, el Ministerio de Industria, Energía y Minería del Uruguay (MIEM) publicó la primera versión de la “Hoja de Ruta de Hidrógeno Verde y derivados en Uruguay” (en adelante HDR) un trabajo elaborado por el BID y el grupo interinstitucional coordinado por el MIEM (con participación de 7 ministerios, la Oficina de Planeamiento y Presupuesto (OPP) y 8 organizaciones del Estado con base en el análisis técnico realizado por la consultora McKinsey & Co, y que pone de manifiesto la apuesta del país para consolidar una industria del HV y derivados. El documento fue entonces no solamente producto de una coordinación interinstitucional y diversos estudios técnicos, sino que también se desarrollaron instancias de intercambio con actores relevantes del sector, en mesas de trabajo con más de 70 representantes del ámbito nacional e internacional, en relación a oferta y demanda de HV y derivados, aspectos regulatorios, permisos, financiamiento, infraestructura, y finalmente la propuesta de un borrador de Hoja de Ruta, la cual de acuerdo a su redacción fue puesto en consulta pública mediante publicación en su página web, talleres con la sociedad civil, ámbito académico y sector privado y presentación en partidos políticos, Congreso de Intendentes, ante Senadores y Diputados. En julio 2024 se publicó una versión final revisada del mismo documento⁷ el cual señala que “luego de este proceso de análisis e intercambio con actores relevantes a nivel nacional e internacional, se concluye que Uruguay tiene muy buenas condiciones para el desarrollo de la economía del hidrógeno verde y derivados, tanto para su uso a nivel local como para la exportación. (MIEM, 2024, p. 16).

El ex ministro de Industria Omar Paganini ha afirmado que el HV se trata de “una estrategia hacia la prosperidad apoyada en nuestras ventajas competitivas, el impulso a la nueva economía verde como fuente de desarrollo” (MIEM 2024, p. 7). En la introducción de la HDR, el exjerarca también señala:

“pero también, y aquí es donde el país tiene una oportunidad propia, se puede combinar el hidrógeno con anhídrido carbónico (CO₂) de origen biológico (CO₂ biogénico) y producir metanol, que será metanol verde y, a partir de él, gasolina, gasoil o jet de aviación, combustibles idénticos a los conocidos, pero sintéticos, es decir que no provienen del petróleo. (...) Uruguay desarrollará una nueva industria exportadora de energéticos verdes, una industria a partir de recursos autóctonos, pero una industria que

⁷ https://www.gub.uy/ministerio-industria-energia-mineria/sites/ministerio-industria-energia-mineria/files/documentos/noticias/Hoja%20de%20ruta%20H2%20Uruguay_final.pdf.

agregará valor, generará empleo, atraerá inversiones y tecnología. Nuestra estrategia de transición energética se transformará en una nueva fuente de valor agregado para la economía nacional, con un potencial similar a nuestros tradicionales rubros de exportación. Lo más importante, esta industria aportará al bienestar para nuestra gente, con empleos de calidad, con obras e inversiones, una industria territorialmente descentralizada, un verdadero nuevo eslabón en nuestras cadenas agroindustriales. Es una gran oportunidad que tenemos que poder aprovechar, que nos posicionará en un lugar de liderazgo a nivel mundial. Un paso en el camino al desarrollo. No podemos dejarla pasar”, (MIEM, 2024, p.8)

En la sección inicial de la HDR, el ex Ministro agrega que “nuestro país posee muchos más recursos renovables sobre su territorio de los que necesitaría para soportar sus necesidades actuales y futuras” y que “el viento y el sol en Uruguay son recursos complementarios, porque generalmente su mayor intensidad se da en momentos diferentes del día y en estaciones diferentes del año”. Añade que “el agua en nuestro país es muy abundante, y su uso para la estrategia de hidrógeno verde será muy inferior a los usos actuales, agrícola, industrial, residencial que se registran hoy”. Aclara, finalmente, que “Uruguay es un país donde el desarrollo de esta industria no afectará el recurso acuífero, si se maneja de manera profesional y buscando la sustentabilidad de los diferentes cursos y reservorios acuíferos. (...) Es una gran oportunidad que tenemos que poder aprovechar, que nos posicionará en un lugar de liderazgo a nivel mundial. Un paso en el camino al desarrollo” (MIEM, 2024, p.8).

Otro punto interesante sobre la HDR es que señala en varias oportunidades que en un escenario proyectado de alta demanda tanto europea como asiática “Uruguay tiene las condiciones para ubicarse entre aquellos exportadores de HV” (MIEM, 2024, p. 12). En este sentido se proyecta que para 2030 los costos de producción de hidrógeno verde podrían ubicarse entre 1,2 y 1,4 USD/kgH₂. Asimismo, para 2040, se espera contar con una producción de hidrógeno cercana al millón de toneladas por año, lo que requerirá 18 GW de energías renovables dedicadas al desarrollo del HV y 9 GW de capacidad instalada de electrolizadores (MIEM, 2024, p. 12).

Si bien la HDR ubica a Uruguay como un “exportador neto” junto a países como España, Australia, Argelia, Arabia Saudita y Chile, teniendo en cuenta que Uruguay iguala a España en cuanto a su competitividad de costos, no limita a Uruguay en su rol de exportador de HV, sino que también plantea que el país tiene especial potencial de

producir nuevos productos en base a HV como combustibles, materias primas para la industria y fertilizantes verdes, para lo que se requiere dióxido de carbono de origen vegetal proveniente de industrias nacionales que utilizan biomasa sostenible en sus procesos productivos (MIEM, 2024). Es decir que plantea el objetivo de situarse en escalones más arriba de la cadena de valor, aquellos que poseen un mayor valor agregado. Puntualmente, se menciona que el desarrollo de una economía del HV a nivel nacional aportará a la diversificación de la matriz productiva nacional, aumentando el valor agregado a través de un nuevo eslabón industrial y desarrollando nuevos mercados de exportación.

En este sentido, el documento plantea una “Ambición 2040”, que consiste en un plan en 3 fases basado en las ventajas competitivas mencionadas, sobre todo en combustibles sintéticos, materias primas y fertilizantes basados en HV. En la primera fase (hasta 2025) se plantea “impulsar el desarrollo del mercado doméstico y sentar las bases para los primeros proyectos de exportación”. (MIEM, 2024, p. 43), avanzando en aspectos regulatorios, ingeniería de obras de infraestructura e implementación de incentivos y realización de estudios.

La fase 2, que va de 2026 a 2030, se plantea escalar el mercado doméstico en cuanto a demanda y proyectos, y tener en operación los primeros proyectos para exportación (como e-metanol), análisis y desarrollo de infraestructuras, incentivo de atracción de inversiones a través de mejorar de competitividad y estímulo a la demanda interna, buscando generar un nuevo sector industrial con creación de empleo y sustitución de importaciones.

En la última fase apuntará a la consolidación del mercado doméstico, “desarrollando la cadena de valor del HV y derivados” a través del desarrollo de infraestructuras logísticas o portuarias, la producción *offshore* en la costa atlántica. También plantea escalar hacia la producción y exportación de productos como HV y amoníaco verde. Esto “permitirá diversificar la matriz productiva nacional, al aumentar el valor agregado a través de la incorporación de un nuevo eslabón industrial” (MIEM, 2024:12).

Otro aspecto destacable que introduce el documento es la experiencia del país en décadas de desarrollo de proyectos de energías renovables, marcos regulatorios sólidos, estabilidad política, institucional y legal, solidez macroeconómica, así como el hecho de

que Uruguay ha alcanzado prácticamente la descarbonización de la generación de energía eléctrica, mayor al 90% -94% en el período 2016-2022- (MIEM, 2024).

La conclusión principal a la que arriba el documento es que nuestro país tiene muy buenas condiciones para el desarrollo de la economía del hidrógeno verde y derivados, tanto para su uso a nivel local como para la exportación. Por tanto, se destaca la importancia de construir una política de estado alrededor del HV, entendiendo que el Estado tendrá un rol clave como coordinador, impulsor y responsable de la gestión de la economía del HV y será el que “asegure el uso eficiente de los recursos locales, promueva el diálogo y cree un entorno que permita el desarrollo a largo plazo y la agregación de valor local”.

8. Discusión teórica-metodológica con Eicke y De Blasio (2022)

La reflexión que sigue a continuación pretende arrojar luz sobre el enfoque metodológico planteado por Eicke & De Blasio y sus posibles limitaciones para analizar las potencialidades de los países para insertarse al mercado global de derivados del HV.

Antes que nada, resulta importante señalar que es claro que Uruguay, por su tamaño relativo, difícilmente pueda incluirse entre aquellos países “líderes” o con un “rol relevante” en los mercados globales. Sin embargo, la idea detrás de este ejercicio es reflexionar cómo las formas de medir y clasificar las potencialidades de los países podrían moldear políticas, prioridades, estrategias y narrativas de desarrollo.

Más allá del rico contenido teórico complementario que incluyen Eicke & De Blasio al comienzo de su artículo, se podría argumentar que la lógica clasificatoria utilizada resulta estática, en tanto observa condiciones presentes en los países y se clasifican con una lógica binaria en 0 o 1 en cuanto a, por ejemplo, su política industrial existente. Por un lado, esto reduce la complejidad y los matices de los procesos de transformación, y, por otro, no da relevancia a la potencialidad del desarrollo de estos sectores, lo cual podría inducir a identificar una menor inversión en I+D, infraestructura o formación técnica, o guiar estrategias gubernamentales hacia roles pasivos como limitarse a exportar materias primas o energía, sin agregación de valor local.

Asimismo, el enfoque no contempla las dinámicas institucionales propias de los sistemas nacionales de innovación, donde la interacción entre Estado, industria, academia y sociedad civil puede moldear nuevas oportunidades de inserción productiva. Como señalan Marín y Pérez (2015), el desarrollo debe entenderse como una capacidad de transformación articulada en torno a ventanas de oportunidad tecnológicas e institucionales. Desde esta óptica, los países considerados *bystanders* podrían, bajo ciertas condiciones, reposicionarse activamente en las cadenas globales de valor emergentes, especialmente en mercados inmaduros como el del hidrógeno verde, donde las reglas aún están en construcción. Tal como plantea Pérez (2001, 2010), las grandes transformaciones tecnológicas no solo reconfiguran las cadenas de valor existentes, sino que también abren “ventanas de oportunidad” que permiten a países rezagados reposicionarse estratégicamente si logran aprovechar el momento adecuado (el *timing*) y cuentan con políticas públicas activas. En este sentido, una metodología que no contempla

los ciclos de maduración tecnológica ni las capacidades endógenas para articular una estrategia de inserción temprana puede conducir a errores de diagnóstico sobre el verdadero potencial de los países para avanzar en procesos de innovación, industrialización y agregación de valor.

El HV puede dar origen a nuevas industrias y sectores económicos, creando empleos y desarrollando nuevas cadenas de valor o mejorando nuestra posición en las mismas “escalando en la cadena de valor”. Como indica IRENA en su análisis de las cadenas de valor del HV, la materialización de los potenciales beneficios económicos que genera el HV depende de factores como capacidad industrial existente y accesibilidad a la tecnología en tanto que los proyectos de exportación a gran escala podrían mejorar la balanza de pagos del país, pero pueden no estimular las capacidades industriales como aquellos proyectos que se enfocan en la descarbonización industrial o proyectos de I+D en nuevas tecnologías del HV (UNIDO, IRENA, & IDOS, 2023).

Por otra parte, si bien Eicke y De Blasio reconocen que las dinámicas políticas y tecnológicas pueden modificar estas posiciones en el tiempo, su marco analítico no las incorpora de forma sustantiva en la construcción de la tipología ni en las recomendaciones de política. En este sentido, su clasificación puede ser útil como fotografía inicial, pero no como herramienta predictiva ni prescriptiva robusta para orientar políticas industriales en contextos de transformación incipiente, como el de los mercados del hidrógeno verde.

Por tanto, es clave considerar el rol de la coordinación de una política pública efectiva para generar las bases del desarrollo de una cadena de valor robusta y adaptada al contexto local. Estas estrategias pueden ir desde el fomento de la diversificación industrial, incentivando industrias nuevas y existentes para que desarrollen “productos verdes”, la implementación de requisitos de contenido local (LCRs) para impulsar inversiones productivas locales y avance tecnológico en alguno de los eslabones. Por otra parte, también se podría estimular la demanda gubernamental de productos verdes como el “acero verde” en licitaciones y obras de infraestructura gubernamentales para impulsar la demanda para apoyar a los productores, así como subsidios públicos diversos (UNIDO, IRENA, & IDOS, 2023).

Por otra parte, el enfoque planteado no ofrece herramientas analíticas para comprender esas trayectorias de *upgrading* por aprendizaje y acumulación institucional, lo que limita

su utilidad como guía para el diseño de políticas en contextos en transición y podría volverse una profecía autocumplida si orientara políticas a caminos que dejan un poco de lado las variables que se plantearon dentro del marco conceptual, a saber, cambio institucional o dinámicas innovativas, trayectorias tecnológicas, ventana de oportunidad o *upgrading* en la cadena de valor.

De hecho, la misma HDR descrita en secciones anteriores plantea un enfoque un tanto más estratégico y dinámico en cuanto a la potencialidad de Uruguay tanto en el desarrollo del sector del HV como de sus aplicaciones industriales, aunque no es del todo claro cómo se articularían dichas estrategias. El documento resalta que Uruguay cuenta con una fuerte tradición institucional en energías renovables, con altos niveles de penetración en su matriz eléctrica y una experiencia exitosa en transición energética. Estas capacidades acumuladas han posicionado al país como un referente en la región, ubicándose en el sexto lugar con 90% de generación de energía renovable (hidráulica, eólica y solar) (Uruguay XXI, 2023). Este antecedente de construcción institucional y de capacidades es algo que no debería pasarse por alto, en tanto rol del Estado en la apuesta al HV será fundamental, no solo en brindar el ambiente regulatorio, financiero, macroeconómico e institucional adecuado, si no en generar los incentivos, subsidios y lineamientos apropiados para garantizar el desarrollo del sector.

La HDR también destaca la importancia de la cooperación regional para armonizar estándares, compartir tecnología y generar alianzas estratégicas “que impulse sinergias entre países y armonice requisitos que surjan a nivel internacional”. La cooperación regional resulta crecientemente importante para países como Uruguay, con evidentes limitaciones de escala. La generación de acuerdos con la región puede ser un aspecto clave y que nos permita acercarnos a lugares dentro de la cadena de valor del HV que sean más beneficiosos para el país. De manera crucial, el enfoque ya mencionado de las CGV es una gran herramienta para identificar puntualmente cómo y en qué sectores se deben realizar alianzas estratégicas entre países, empresas y organizaciones para impulsar el desarrollo de la infraestructura de hidrógeno verde.

8.1 Una aproximación a las capacidades de CTI en Uruguay

Con el objetivo de profundizar sobre los entornos innovativos en nuestro país, se realizaron dos entrevistas y consultas a dos científicos expertos del área, Leopoldo Suescun y Erika Teliz. Leopoldo es Doctor en Química, profesor Investigador Honorario Grado 4 de PEDECIBA-Química e Investigador Nivel II del SNI. Pertenece al Laboratorio de Cristalografía, Química del Estado Sólido y Materiales/DETEMA de Facultad de Química de la Universidad de la República y cuenta con amplia trayectoria en sectores vinculados al HV, estando también involucrado en actividades de divulgación científica al respecto. La Dra. Erika Teliz es Licenciada en Bioquímica y magíster y doctora en Química por la Universidad de la República. Es docente e investigadora en régimen de dedicación total compartida del Grupo Interdisciplinario de Ingeniería Electroquímica (GIIE)-Facultad de Ingeniería - Facultad de Ciencias, investigadora Grado 3 del PEDECIBA y Nivel I del Sistema Nacional de Investigadores. Su campo de trabajo se desarrolla en el área de Conversión Electroquímica de Energía, para lo que diseñó y armó un laboratorio container para estudios de producción y almacenamiento de hidrógeno verde, así como el desarrollo de nuevos materiales para baterías recargables.

Ambos entrevistados coincidieron en que Uruguay cuenta con capacidades científicas y técnicas relevantes, así como una buena reputación internacional como generador de conocimiento. Sin embargo, señalaron que estas capacidades no se traducen automáticamente en innovación industrial ni en apropiación local de valor agregado. La Dra. Teliz subrayó que "Uruguay enfrenta una ventana de oportunidad estratégica con el desarrollo del hidrógeno", pero que para capitalizarla es clave integrar tempranamente al sistema científico-tecnológico en los procesos de decisión, implementación y evaluación de políticas y proyectos. Advirtió también que, si bien el discurso público suele centrarse en el "hidrógeno verde", lo más relevante es avanzar en el desarrollo del hidrógeno como vector energético, entendiendo que las clasificaciones de color dependen muchas veces de normativas y certificaciones internacionales.

Por su parte, el Dr. Suescun enfatizó que "tenemos una cultura distinta, no tenemos cultura de valorizar la formación de los uruguayos. De darle el valor que tiene un doctorado en cualquier área de la ciencia. Y dejamos que se vayan. O, los echamos".

Reconoció que Uruguay forma investigadores de nivel competitivo pero que, sin infraestructura adecuada, continuidad en la financiación y condiciones institucionales estables, muchos terminan emigrando o abandonando líneas de investigación prometedoras.

Por otra parte, ambos coincidieron en que los principales cuellos de botella para el desarrollo del HV en Uruguay están más vinculados a la falta de continuidad de las políticas públicas que a carencias tecnológicas. La inestabilidad en los fondos de investigación, la escasa articulación entre actores académicos y empresariales, y la falta de planificación estratégica para la formación de recursos humanos fueron señalados como limitaciones críticas.

Suescun ilustra esta situación a través de su experiencia personal con el Fondo Sectorial de Energía: "En 2009 se creó un fondo orientado a las renovables, y tuve continuidad por casi diez años. Pero en 2019 cambió el perfil, y ni siquiera aceptaron mi postulación. De 2019 a 2022, hubo una sequía total de proyectos. En ese período, uno de mis estudiantes, que estaba con la maestría avanzada, terminó yéndose a hacer el doctorado afuera". Esta falta de previsibilidad, sumada a la inexistencia de estructuras que garanticen la permanencia de investigadores formados, constituye uno de los principales factores que impiden el desarrollo de una masa crítica en el área. Es importante destacar, a su vez, que esto es algo que se mantiene a través de los gobiernos.

Ambos científicos coincidieron en que la integración de la academia en los procesos industriales no puede quedar librada a la buena voluntad de las empresas. Suescun comentó: "No es necesario inventar la pólvora acá, lo que hay que hacer es que los que traigan tecnología tengan la obligación de interactuar con el medio académico". Propone que esta obligación quede explícita en los contratos de instalación de empresas internacionales, a fin de asegurar transferencia de conocimiento, formación práctica y posibilidades de codesarrollo: "Todas las empresas que van a venir a instalarse a Uruguay tienen, en sus países de origen, contactos fuertes con las universidades o centros de investigación asociados que desarrollaron los sistemas. Acá también deberían tenerlos". Además, destacó que, si se cumplen las metas de generación de empleo que sugiere la HDR, será imprescindible desplegar políticas intensivas de formación: "Se habla de 32.000 puestos de trabajo para 2040, entre los cuales un 10 a 20% serían técnicos,

ingenieros o tecnólogos. Si contás cuántos ingenieros se reciben por año, y todos los dedicás al hidrógeno, no alcanza”. La urgencia de formar, retener y revalorizar al personal científico-técnico fue una constante en su diagnóstico.

Por su parte, la Dra. Teliz propone avanzar hacia la creación de un centro nacional de energía que articule el conocimiento técnico y académico en diferentes áreas. Este centro, según planteó, debería reunir a las universidades públicas, empresas estatales y ministerios estratégicos, con el objetivo de fomentar la innovación, promover la formación y generar soluciones concretas a los desafíos del sector. También subrayó la necesidad de definir reglas claras para la transferencia tecnológica, incluyendo criterios de participación efectiva de proveedores y servicios técnicos nacionales, así como acceso académico a los datos e información generada por las empresas, bajo condiciones de confidencialidad y utilidad científica.

Por último, ambos entrevistados destacaron la cooperación regional como un eje estratégico aún poco explorado. Reconocieron que Uruguay, por su escala limitada, difícilmente podrá sostener una industria del HV a gran escala en forma autónoma, por lo que integrarse a esquemas regionales con Brasil, Argentina o Chile podría ser clave para consolidar cadenas de valor más sólidas y sostenibles. La experiencia histórica de Uruguay como proveedor de componentes en la cadena automotriz del Mercosur es un buen ejemplo de que es posible insertarse en segmentos industriales relevantes sin necesidad de abarcar toda la cadena. Suescun mencionó además que Uruguay tiene buena imagen internacional, lo que facilitaría la atracción de estudiantes e investigadores extranjeros, pero advirtió que no parece haber financiamiento disponible para esto. Consideró fundamental promover la movilidad académica, la cooperación con grupos potentes de países vecinos y el financiamiento de pasantías y posdoctorados para construir un entorno innovador robusto.

Las entrevistas permitieron confirmar que la ventana de oportunidad que ofrece el HV para Uruguay no depende únicamente de la disponibilidad de recursos naturales o de la atracción de inversión extranjera, sino de la capacidad del país para construir un ecosistema de innovación robusto, articulado y sostenido en el tiempo. Esta dimensión, clave para entender las posibilidades de desarrollo, no es contemplada por las variables utilizadas por Eicke y De Blasio en su clasificación, lo que limita su capacidad explicativa

para el caso uruguayo y otros países del Sur Global. En este sentido, los testimonios recogidos refuerzan la hipótesis central de este trabajo: el posicionamiento de Uruguay en los mercados industriales del HV no es una cuestión exclusivamente técnica. Para desempeñar un rol activo en estos mercados emergentes, el país debe apostar por un modelo de desarrollo basado en capacidades endógenas, cooperación estratégica y articulación entre ciencia básica y ciencia aplicada. La transformación energética puede y debe ser también una transformación productiva, institucional y cultural.

9. Conclusiones

El avance del HV como vector energético global plantea nuevas preguntas para países como Uruguay. Si bien la trayectoria y capacidad industrial de nuestro país es limitada, su experiencia en energías renovables, su estabilidad institucional y su matriz eléctrica casi descarbonizada podrían dar a entender que Uruguay tiene serias potencialidades de expandir sus capacidades industriales en este terreno. Sin embargo, son muchas las decisiones de política que deben acompañar este proceso para que se logre minimizar los riesgos y aprovechar las oportunidades que parecen presentarse a partir de esta “revolución del HV” a nivel mundial.

Para ello, es esencial no solo un marco y entorno regulatorio apropiado, si no que se tomen las decisiones necesarias que fomenten un entorno de investigación de innovación y de cooperación regional que permitan a Uruguay aprovechar esta oportunidad sin caer en esquemas tradicionales de enclave, donde el país ofrezca únicamente sus recursos naturales y su ecología al servicio de intereses externos.

La literatura especializada sugiere que los países que logren insertarse de manera temprana y estratégica en las cadenas globales del HV o sus derivados (como el amoníaco, acero y metanol) pueden generar importantes derrames tecnológicos e industriales. No obstante, estas oportunidades solo se materializan cuando existe una política pública coherente que articule capacidades tecnológicas, marcos normativos adecuados y objetivos de desarrollo humano y sostenible.

Desde esta perspectiva, el presente trabajo permite afirmar que el aprovechamiento de las oportunidades que brinda el HV para Uruguay dependerá menos de sus ventajas estáticas y más de su capacidad para activar un proceso dinámico de transformación productiva y tecnológica.

En ese sentido, Uruguay enfrenta el desafío de traducir su potencial energético en un proyecto de transformación productiva que promueva encadenamientos, agregación de valor y generación de capacidades tecnológicas locales.

El marco analítico de Eicke y De Blasio (2022), si bien útil como herramienta clasificatoria, resulta limitado al adoptar una lógica de estática comparativa que clasifica a los países según condiciones presentes sin considerar trayectorias, capacidades en construcción o procesos de *upgrading*. Un diagnóstico estático puede convertirse en una profecía autocumplida si orienta políticas hacia caminos estrechos que no contemplan el cambio institucional, la innovación o el cambio tecnológico.

Por ello, se propone complementar este tipo de análisis con enfoques más dinámicos y contextualmente sensibles, como el de las cadenas globales de valor con *upgrading* Gereffi, G., & Fernandez-Stark, K. (2016) y los paradigmas tecnoeconómico de Pérez (2001, 2010). Tal como lo plantean Pérez (2001) y Arocena (2024), el desarrollo debe entenderse como una construcción institucional e histórica, donde confluyen trayectorias tecnológicas, capacidades sociales de aprendizaje, políticas públicas coherentes y marcos normativos que direccionen la innovación hacia objetivos de bienestar colectivo. Estos marcos permiten observar cómo la combinación de políticas públicas, cooperación regional, aprendizaje institucional y visión estratégica puede reposicionar a países del Sur Global en sectores tecnológicamente intensivos, incluso cuando parten de condiciones estructurales limitadas.

En este contexto, las entrevistas realizadas a los doctores Leopoldo Suescun y Erika Teliz aportan evidencia empírica clave. Ambos destacan que, sin fortalecimiento del ecosistema científico tecnológico y reglas claras de gobernanza y articulación con la política pública, Uruguay corre el riesgo de quedar atrapado en una lógica de exportación de recursos y conocimiento, sin apropiación local del valor. Subrayan también el papel crucial de la cooperación regional como vía para superar las limitaciones de escala y construir una inserción más sólida en cadenas de valor industriales. Estas perspectivas refuerzan la necesidad de políticas deliberadas que prioricen el desarrollo de capacidades endógenas y una estrategia de inserción activa.

En consecuencia, emerge como recomendación avanzar hacia un modelo de inserción estratégica en la economía del HV que evite reproducir lógicas tradicionales de enclave exportador. Para ello, es clave apoyarse en dos pilares fundamentales: por un lado, el desarrollo de capacidades tecnológicas y productivas locales a lo largo de la cadena de

valor, con foco en la ingeniería, el desarrollo logístico y la transformación de productos derivados; y, por otro, la priorización de aplicaciones internas del HV, especialmente aquellas orientadas a fortalecer sectores industriales y agroindustriales existentes o emergentes.

En última instancia, cualquier estrategia de inserción del HV en nuestro país debe evaluarse también a la luz de los objetivos del desarrollo humano sostenible y, por tanto, por su capacidad de expandir las libertades reales de las personas, asegurar la sostenibilidad ambiental y promover un modelo más equitativo de apropiación de los beneficios. Un modelo que ignore estas dimensiones corre el riesgo de profundizar desigualdades y consolidar estrategias extractivas.

10. Referencias bibliográficas.

- Arocena, R. (2024). Sobre las posibilidades de un nuevo desarrollo latinoamericano: Poder, conocimiento y agencia: Una mirada desde Uruguay. En J. Sutz & I. Bortagaray (Comps.), *Desarrollo, ciencia, tecnología, innovación y sus interacciones: Perspectivas y propuestas diversas* (pp. 17–66). Editorial Fin de Siglo.
<https://citinde.ei.udelar.edu.uy/uploads/bibliografia/829823e5f23f963377ffc6f36fdccb9b2c4edc17.pdf>
- Bertoni, R., & Román, M. (2006). Energía y desarrollo: La transición energética en Uruguay (1882–2000). *Boletín de la Asociación Uruguaya de Historia Económica*, (5), 19–31.
https://www.audhe.uy/Boletin_Audhe/Boletin_5/AUDHE%20N_5%20completo.pdf#page=19
- Bertoni, R., & Messina, P. (2023). *Logros, limitaciones y desafíos de la revolución eólica en Uruguay* (Documento de Trabajo PHES N.º 70). Departamento de Economía, Facultad de Ciencias Sociales, Universidad de la República.
<https://www.colibri.udelar.edu.uy/jspui/bitstream/20.500.12008/36848/1/DT%20PHES%2070.pdf>
- Bortagaray, I., & Stuhldreher, A. (2024). Mudanzas, persistencias y tensiones en la reflexión sobre el desarrollo: Una mirada con acento en la crisis de la sustentabilidad. En J. Sutz & I. Bortagaray (Comps.), *Desarrollo, ciencia, tecnología, innovación y sus interacciones: Perspectivas y propuestas diversas* (pp. 126–141). Editorial Fin de Siglo.
<https://citinde.ei.udelar.edu.uy/uploads/bibliografia/829823e5f23f963377ffc6f36fdccb9b2c4edc17.pdf>
- Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo. (1987). *Nuestro futuro común: Informe de la Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo*.
https://www.ecominga.uqam.ca/PDF/BIBLIOGRAPHIE/GUIDE_LECTURE_1/CMMAD-Informe-Comision-Brundtland-sobre-Medio-Ambiente-Desarrollo.pdf

- Eicke, L., & De Blasio, N. (2022). *The future of green hydrogen value chains: Geopolitical and market implications in the industrial sector*. Belfer Center for Science and International Affairs, Harvard Kennedy School.
https://www.belfercenter.org/sites/default/files/pantheon_files/files/publication/Paper_MappingHydrogen_Final.pdf
- Ferragut, P., Goldenberg, F., Correa, C., & Gischler, C. (2022). *Hidrógeno verde y el potencial para Uruguay: Insumos para la elaboración de la Hoja de Ruta de Hidrógeno Verde de Uruguay*. Banco Interamericano de Desarrollo.
<https://doi.org/10.18235/0004615>
- Fornillo, B. (2021). Transición energética en Uruguay: ¿Dominio del mercado o potencia público-social? *Ambiente & Sociedade*, 24, 1–17.
https://www.researchgate.net/publication/350827753_Energy_transition_in_Uruguay_market_dominance_or_public-social_power
- Gereffi, G., & Fernandez-Stark, K. (2016). *Manual para el análisis de las cadenas globales de valor* (G. Canale, Trad.; 2.^a ed.). Duke Center on Globalization, Governance & Competitiveness.
<https://www.proyectaryproducir.com.ar/wp-content/uploads/2021/06/Gereffi-Manual-de-CGV-Segunda-Ed.pdf>
<https://www.proyectaryproducir.com.ar/wp-content/uploads/2021/06/Gereffi-Manual-de-CGV-Segunda-Ed.pdf>
- Hutt, M. D., & Speh, T. W. (2024). *Business marketing management: B2B* (13th ed.). Cengage Learning.
- International Renewable Energy Agency [IRENA]. (2022). *Geopolitics of the energy transformation: The hydrogen factor*.
https://www.irena.org/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/Jan/IRENA_Geopolitics_Hydrogen_2022.pdf
- International Renewable Energy Agency [IRENA]. (2023). *International trade and green hydrogen: Supporting the global transition to a low-carbon economy*.
https://www.wto.org/english/res_e/booksp_e/green_hydrogen_e.pdf
- La Diaria. (2024a, 12 de diciembre). “Secretismo” e “irrespeto a la institucionalidad”: cruce entre la ministra Facio y el expresidente de ANCAP por el proyecto de hidrógeno verde.

<https://ladiaria.com.uy/politica/articulo/2024/12/secretismo-e-irrespeto-a-la-institucionalidad-cruce-entre-la-ministra-facio-y-el-expresidente-de-ancap-por-el-proyecto-de-hidrogeno-verde/>

La Diaria. (2024b, 13 de diciembre). Renunció el presidente de ANCAP tras discrepancias sobre proyecto de hidrógeno verde.

<https://ladiaria.com.uy/politica/articulo/2024/12/renuncio-el-presidente-de-ancap-tras-discrepancias-sobre-proyecto-de-hidrogeno-verde/>

Linares, P. (2018). *La transición energética*. *Ambienta*, (125), 20–31.

https://www.mapama.gob.es/app/ministerio/pags/Biblioteca/Revistas/pdf_AM%20FPDF_AM_Ambienta_2018_125_20_31.pdf

Marín, A., & Pérez, C. (2015). Cambio tecnológico y desarrollo sustentable. *Integración & Comercio*, 19(39), 111–122.

https://ri.conicet.gov.ar/bitstream/handle/11336/69862/CONICET_Digital_Nro.4e7ce249-6c1d-4fe9-b148-dcflf5bfe99e_A.pdf?sequence=2&isAllowed=y

Marín, A., & Pérez, C. (2024). Nuevas perspectivas para el desarrollo en base a recursos naturales: Una visión neo-schumpeteriana para América Latina. En J. Sánchez & M. León (Eds.), *Recursos naturales y desarrollo sostenible: Propuestas teóricas en el contexto de América Latina y el Caribe* (pp. 33–55). CEPAL [Serie Recursos Naturales y Desarrollo].

Mazzeo, N., Zurbriggen, C., Sciandro, J., Trimble, M., Gadino, I., & Pérez, D. (2021). Agua, ambiente y territorio: Avances, barreras y desafíos en la gobernanza de los recursos hídricos. En G. Bidegain Ponte, M. Freigedo, & C. Zurbriggen (Comps.), *Fin de un ciclo: Balance del Estado y las políticas públicas tras 15 años de gobiernos de izquierda en Uruguay* (pp. 505–529). Universidad de la República, Facultad de Ciencias Sociales, Departamento de Ciencia Política.
<https://www.colibri.udelar.edu.uy/jspui/handle/20.500.12008/37467>

Méndez, R. (2021). Las políticas públicas y la energía en el ciclo progresista. En G. Bidegain Ponte, M. Freigedo, & C. Zurbriggen (Comps.), *Fin de un ciclo:*

Balance del Estado y las políticas públicas tras 15 años de gobiernos de izquierda en Uruguay (pp. 429–453). Universidad de la República, Facultad de Ciencias Sociales, Departamento de Ciencia Política.

<https://www.colibri.udelar.edu.uy/jspui/handle/20.500.12008/37467>

Ministerio de Industria, Energía y Minería. (2023a, 26 de abril). *Ministro Omar Paganini dijo que la estrategia de hidrógeno verde del Gobierno comenzó a dar “frutos reales”*

<https://www.gub.uy/ministerio-industria-energia-mineria/comunicacion/noticias/ministro-omar-paganini-dijo-estrategia-hidrogeno-verde-del-gobierno-comenzo>

Ministerio de Industria, Energía y Minería. (2023b, 18 de julio). *Memorándum de entendimiento en materia de energías renovables, eficiencia energética e hidrógeno renovables*. (Uruguay y Unión Europea)

<https://www.gub.uy/ministerio-industria-energia-mineria/politicas-y-gestion/convenios/memorandum-entendimiento-materia-energias-renovables-eficiencia>

Ministerio de Industria, Energía y Minería. (2024). *Hoja de ruta del hidrógeno verde y derivados en Uruguay*.

https://www.gub.uy/ministerio-industria-energia-mineria/sites/ministerio-industria-energia-mineria/files/documentos/noticias/Hoja%20de%20ruta%20H2%20Uruguay_final.pdf

Naciones Unidas. (s.f.). *Acuerdo de París*.

https://unfccc.int/sites/default/files/spanish_paris_agreement.pdf

Oficina Económica y Comercial de la Embajada de España en Montevideo. (2021, diciembre). *Movilidad eléctrica e hidrógeno verde en Uruguay*.

<https://www.icex.es/content/dam/es/icex/documentos/quienes-somos/donde-estamos/red-exterior/uruguay/Movilidad%20el%C3%A9ctrica%20e%20hidrógeno%20verde%20en%20Uruguay%202021.pdf>

Pérez, C. (2001, agosto). *Cambio tecnológico y oportunidades de desarrollo como blanco móvil*. Ponencia presentada en el seminario “La teoría del desarrollo en

los albores del siglo XXI”, Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), Santiago de Chile.

https://carlotaperez.org/wp-content/downloads/publicaciones/desarrollo-sostenible/S2001538_es.pdf

Pérez, C. (2010). *Revoluciones tecnológicas y paradigmas tecno-económicos* [Traducción al español del artículo original publicado en Cambridge Journal of Economics, 34(1), 185–202].

https://www.carlotaperez.org/downloads/Revoluciones_tecnológicas_y_paradigmas_tecno-económicos.pdf

Pérez, C., Marín, A., & Navas-Alemán, L. (2013). El posible rol dinámico de las redes basadas en recursos naturales para las estrategias de desarrollo en América Latina. En G. Dutrénit & J. Sutz (Eds.), *Sistemas de innovación para un desarrollo inclusivo: La experiencia latinoamericana* (pp. 347–377). Foro Consultivo Científico y Tecnológico.

https://carlotaperez.org/wp-content/downloads/publicaciones/desarrollo-sostenible/Perez_Marin_Navas-Aleman%20_20130827_Final.pdf

Sen, A. (1999). *Development as Freedom*. Oxford University Press.

United Nations Industrial Development Organization (UNIDO), International Renewable Energy Agency (IRENA), & German Institute of Development and Sustainability (IDOS). (2023). *Green hydrogen for sustainable industrial development: A policy toolkit for developing countries*.

<https://www.unido.org/sites/default/files/unido-publications/2024-02/Green%20hydrogen%20for%20Sustainable%20Industrial%20Development%20A%20Policy%20Toolkit%20for%20Developing%20Countries.pdf>

Uruguay XXI. (2023, 10 de octubre). *Uruguay lidera ranking mundial de energías renovables por su exitoso proceso de transición energética*.

<https://www.uruguayxxi.gub.uy/es/noticias/articulo/uruguay-lidera-ranking-mundial-de-energias-renovables-por-su-exitoso-proceso-de-transicion-energetica/>

Uruguay XXI. (2024). *Energías renovables en Uruguay*.

<https://www.uruguayxxi.gub.uy/uploads/informacion/bb0a5729fa124323f033e646cfb13230af675b62.pdf>

11. Anexo: Plantilla de entrevista utilizada con expertos:

Estimado/a _____,

Mi nombre es Jimena Beloso Escardó y actualmente estoy finalizando la Licenciatura en Desarrollo en la Universidad de la República. Me encuentro desarrollando mi monografía de grado, titulada “Ventanas de oportunidad y política industrial verde: Uruguay frente al desafío del hidrógeno”, bajo la tutoría del Dr. Reto Bertoni.

En el marco de este trabajo, me interesaría conocer la visión de científicos y expertos sobre el estado actual de la innovación científica y tecnológica en Uruguay en relación con el hidrógeno verde (HV).

Sería un gran aporte poder contar con su mirada sobre algunas preguntas breves que le comparto a continuación. En caso de que lo prefiera, también estoy disponible para coordinar un breve intercambio por teléfono o presencial.

1. *¿Podría describir brevemente en qué tipo de investigaciones, desarrollos tecnológicos o proyectos vinculados al hidrógeno verde ha formado parte en Uruguay?*

Le agradecería si pudiera mencionar también las instituciones involucradas y si los proyectos incluyeron colaboraciones nacionales o internacionales.

2. *¿Qué potencialidades prácticas de innovación local ve en Uruguay en relación con el desarrollo de la cadena de valor del hidrógeno verde y sus derivados? Se entiende por cadena de valor del HV a todas aquellas actividades involucradas, desde la producción de conocimiento, innovación, desarrollo tecnológico en distintas áreas, hasta aplicaciones industriales o comerciales.*

3. *¿Cuáles considera que son los principales obstáculos para el aprovechamiento efectivo de las potencialidades mencionadas en la pregunta anterior?*

Muchas gracias desde ya por su tiempo y disposición.

*Jimena Beloso Escardó
Estudiante | Licenciatura en Desarrollo
Universidad de la República
Correo: jimenabeloso@gmail.com*