

Uso de agua en la producción de Hidrógeno Verde y sus derivados

Ing. Víctor Emmer
Abril 2025

Introducción

Los esfuerzos para la desfosilización de la economía han hecho surgir al hidrógeno verde y sus derivados como una alternativa efectiva en ese sentido. No obstante, la gestión ambiental de este sector supone un gran desafío y debe ser analizada en profundidad para evitar que ocurra un desplazamiento de cargas ambientales no deseado.

Uno de los aspectos ambientales de mayor significancia asociado a este tipo de emprendimientos corresponde al uso del agua en los procesos involucrados. La alta sensibilidad de la sociedad y la población en general, incrementada por los recientes eventos de déficit hídrico que afectaron la disponibilidad y abastecimiento de agua, genera la necesidad de prestar especial atención a este aspecto en particular.

Por otro lado, al ser un sector relativamente nuevo, aún en desarrollo, sin demasiados proyectos instalados a escala industrial plena, la información que se cuenta de los procesos de es escasa y poco precisa.

En este marco se entiende necesario profundizar el análisis del consumo de agua en la producción de hidrógeno verde y derivados, que permita generar la información necesaria para determinar el impacto potencial de este sector.

Objetivos

Objetivo general

Profundizar el análisis del consumo de agua en los procesos de producción de hidrógeno verde y sus derivados, que permita establecer rangos esperables de consumo de agua del sector, así como los aspectos técnicos que influyen sobre esta.

Objetivos específicos

- Profundizar en los procesos industriales de la producción de hidrógeno verde y sus derivados, analizando el balance térmico, especialmente los servicios de uso y consumo de agua.
- Estimar el consumo de agua esperable en la industria de hidrógeno verde y sus derivados, teniendo en cuenta posibles alternativas de acuerdo a las características locales y posibilidades de adaptación de los procesos.

Alcance

Se considera las etapas de producción de hidrógeno y la producción de derivados. Entre los distintos productos derivados del hidrógeno verde, se considera la producción de metanol y combustible de aviación (Sustainable Aviation Fuel, SAF). El modelado de los procesos involucrados se basa en referencias bibliográficas. La escasa información respecto a esta industria, debido al reciente desarrollo del sector, dificultan este tipo de análisis y requiere que los datos estimados sean verificados y validados a la medida que se implementen los proyectos previstos.

A los efectos del presente estudio, se cuantifica la extracción total de agua removida de una fuente para satisfacer los requerimientos de la industria. Esta es la cantidad de agua que es considerada para otorgar los permisos de uso de agua. Igualmente, se diferencia el consumo de agua, que corresponde a la fracción de agua que es evaporada o incorporada al producto, que impide que se encuentre disponible para otros posibles (potenciales) usuarios.

Cabe mencionar que el presente estudio busca complementar el trabajo realizado en la consultoría “Evaluación y perspectivas del uso del agua para la producción de hidrógeno verde y derivados en el marco de la Hoja de Ruta del Uruguay” realizada durante 2024 por el instituto de Ingeniería Ambiental y Mecánica de los Fluidos de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República (aún en desarrollo). En dicho trabajo, cuyo objetivo es el análisis de la disponibilidad de agua en Uruguay para abastecer la demanda de este sector, se indican rangos de consumo de agua para la industria basados en referencias internacionales, aunque no se profundiza en los aspectos que en estos y no se presentan datos para el consumo de agua en la producción de derivados.

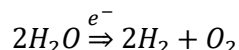
Metodología

- Revisión de antecedentes y referencias bibliográficas para la profundización en los procesos de producción de hidrógeno verde y sus derivados
- Modelado del sistema identificando los principales aspectos que influyen en los procesos. Dado que uno de los principales consumos de agua asociado a esta industria corresponde a los servicios de refrigeración, se hace especial hincapié en el balance térmico del sistema, cuantificando las cargas térmicas asociadas para estimar el requerimiento de agua.
- Identificación de los puntos de consumo de agua en cada etapa del proceso, estimando los requerimientos de cantidad y calidad de agua, así como los servicios necesarios para su suministro.
- Análisis de los resultados y determinación de indicadores de consumo de agua según productos.
- Evaluación de alternativas para reducir el consumo de agua en los procesos de producción de hidrógeno verde y sus derivados.

Modelado de procesos

Producción de hidrógeno verde

La producción de hidrógeno verde se basa en un proceso de electrólisis del agua, que mediante la inyección de energía eléctrica, divide la molécula de agua en hidrógeno y oxígeno, según la siguiente reacción:



El principio básico de la electrólisis consiste en dos electrodos separados por un electrolito, que es el medio responsable de transportar las cargas eléctricas generadas. En la actualidad, existen dos tecnologías principales de electrolizadores con posibilidad de instalaciones comerciales: los electrolizadores alcalinos y los de membrana de intercambio de protones (PEM). Estas se distinguen según el electrolito utilizado y la temperatura de operación, que define los diferentes materiales y componentes de la celda. Los electrolizadores alcalinos son más económicos pero presentan una menor eficiencia, mientras que los PEM utilizan electrodos de platino y permiten una mayor densidad de corriente, por lo que son más eficientes.

Existen otras tecnologías de electrolizadores (de óxido sólido y de membrana de intercambio de aniones (AEM)), que si bien poseen un gran potencial, aún presentan menor nivel de madurez de la tecnología, por lo que no se consideran en el presente estudio.

De esta manera, el agua corresponde a la materia prima en la producción de hidrógeno verde y puede ser considerado que la misma queda incorporada en el producto. De acuerdo a la estequiometría de la reacción, se requieren 9 kg de agua para la producción de 1 kg de hidrógeno.

El proceso de electrólisis requiere de un agua de calidad “ultrapura”, es decir, con baja conductividad, mínimo carbono orgánico y baja concentración de sólidos disueltos, dependiendo de la tecnología de electrólisis la calidad final requerida. El tratamiento necesario para alcanzar esta calidad de agua depende de la fuente y de sus características, pero en general es necesario un tratamiento primario (filtración, desalinización) y un proceso posterior de pulido (desmineralización, ósmosis inversa).

Si bien depende del tipo de tratamiento y la tecnología utilizada, es posible asumir los siguientes coeficientes de recuperación (eficiencia del tratamiento) según la fuente de agua.

Tratamiento	Fuente de agua	Coefficiente de recuperación (%)
Tratamiento primario	Agua de mar	40 - 50
	Agua superficial	90 - 95
	Agua subterránea	98
Pulido (ósmosis inversa)	Tratamiento primario	75*

* Respecto a agua sometida a tratamiento primario.

A su vez, el proceso de electrólisis presenta una eficiencia en el uso de agua de aproximadamente 90 %, que refleja la cantidad de agua que se transforma efectivamente en hidrógeno y las pérdidas que puedan ocurrir del propio hidrógeno.

Por otra parte, la electrólisis de agua teórica (100 % de eficiencia) requiere un aporte de energía de 39,6 kWh/kg de hidrógeno, basada en la entalpía de formación a 25 °C. De acuerdo a



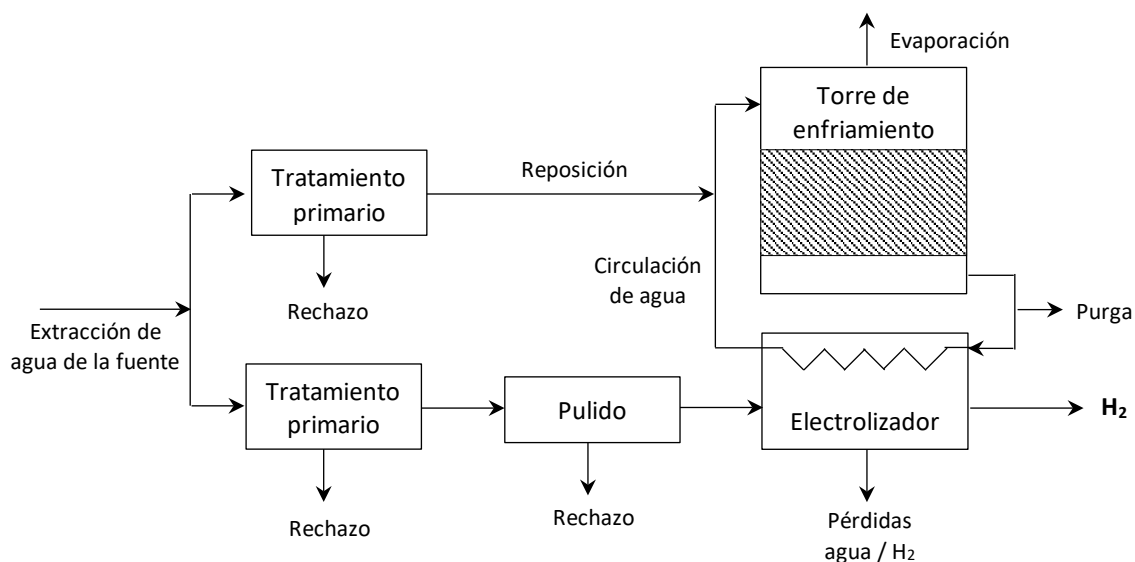
referencias, la electrólisis PEM tiene entre un 60 – 75 % de eficiencia, en comparación con un 50 - 70 % de eficiencia en la electrólisis alcalina. Posiblemente, estos valores de eficiencia puedan ser mejorados en un futuro cercano a través del avance en el desarrollo de la tecnología de electrólisis. La energía que se pierde en el proceso se convierte en calor, que es necesario disipar para mantener la temperatura dentro de los parámetros de operación óptimos.

La refrigeración del electrolizador puede ser realizada de distintas maneras: chiller, circuito abierto de agua de enfriamiento, circuito semi-cerrado de agua con torre de enfriamiento, y refrigeración con aire, siendo estas últimas dos las que mayor factibilidad presentan.

Si bien los costos de instalación y operación son mayores, en nuestro país el enfriamiento con aire es viable y en general es más sostenible, debido a que se minimiza el consumo de agua. No obstante, cabe indicar que los servicios de refrigeración con aire requieren un ajuste final con enfriamiento con agua, aunque en gran parte del año este ajuste puede no ser necesario.

A los efectos del presente estudio, se considera únicamente la refrigeración con agua en circuito semi-cerrado con torre de enfriamiento. Para este sistema se considera una diferencia de temperatura entre entrada y salida de 10 °C y una reposición entre el 1 y 2 % del agua que circula para compensar la evaporación y purga de la torre. A partir de estas suposiciones y las cargas térmicas a disipar, es posible determinar el consumo de agua necesario para cumplir los servicios de refrigeración. Se asume que el agua de reposición es agua del tratamiento primario.

En el diagrama a continuación se detalla el sistema de producción de hidrógeno verde indicando los procesos involucrados y flujos en el suministro de agua, tanto como materia prima como para refrigeración.



Fuente: elaboración propia

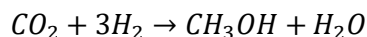
Cabe aclarar que si bien se indican dos procesos separados de tratamiento primario, como alimentación de agua como materia prima al electrolizador y como reposición a la torre de enfriamiento, esto es únicamente a efectos del modelo con el objetivo de diferenciar ambos



requerimientos de agua, ya que este tratamiento primario puede ser el mismo en una única unidad.

Producción de metanol verde

El metanol verde (e-MeOH) se produce por hidrogenación catalítica de CO₂, de acuerdo a la siguiente reacción principal:

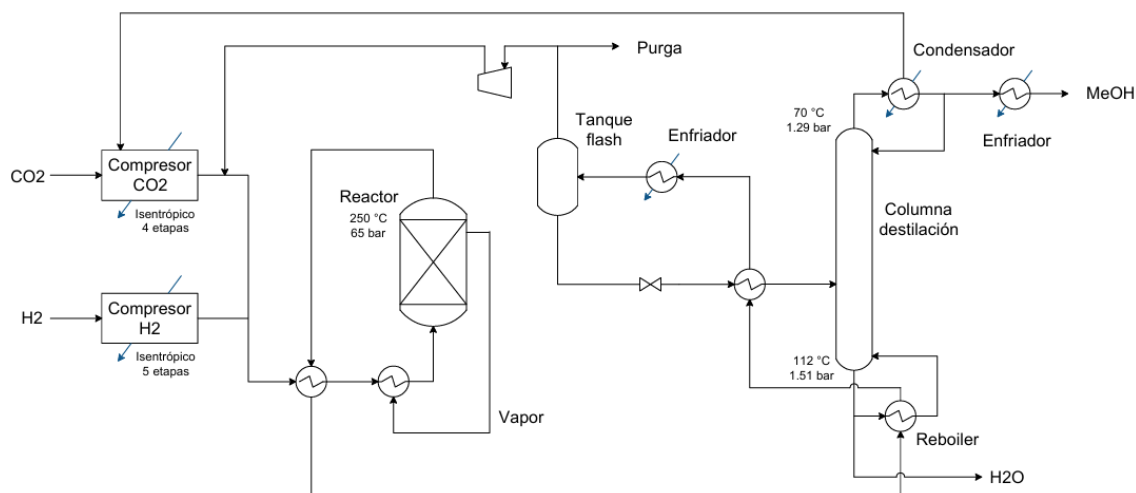


Para ello se utiliza un reactor adiabático de lecho fijo de catalizador de Cu y Zn como principales componentes. Este proceso opera en un rango de temperatura entre 250 y 300 °C y una presión entre 50 y 100 bar. Para mantener la temperatura constante en el reactor se utiliza agua para generar vapor de alta presión que es utilizado en el proceso.

La eficiencia de conversión se maximiza con una relación estequiométrica CO₂:H₂ de 7,35 kg_{CO2}/kg_{H2}, logrando un rendimiento de 5,27 kg_{MeOH}/kg_{H2}. La corriente de salida del reactor es condensada (metanol + agua) y enviada a una columna de destilación, mientras que la corriente gaseosa sin reaccionar (H₂ + CO₂) es recirculada al reactor (Sollai *et al*, 2023).

De acuerdo a la estequiometría de la reacción, la generación de agua en el proceso es de 0,57 kg_{H2O}/kg_{MeOH}, la cual se obtiene en el fondo de la columna de destilación y puede ser reutilizada en el proceso. Sin embargo, esta agua puede contener pequeños niveles de MeOH que puede requerir un tratamiento especial dependiendo del uso que se quiera realizar.

A continuación se muestra un diagrama de flujos con los procesos principales del sistema de producción de e-MeOH, basado en simulaciones de referencias bibliográficas que desarrollan y analizan técnica y económicamente el proceso de producción. Para el presente estudio se identificaron y determinaron las cargas térmicas asociadas a los procesos unitarios de refrigeración, a partir de las cuales se estima el requerimiento de agua de enfriamiento.



Fuente: adaptado de Sollai *et al*, 2023; Vaquerizo-Kiss, 2023.

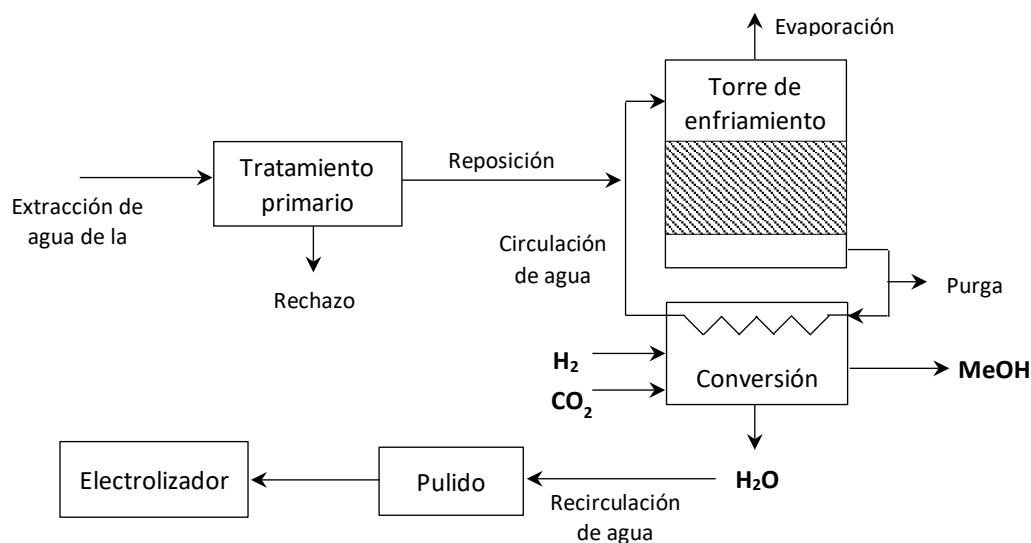
Como se puede observar, el proceso se encuentra integrado térmicamente en sus distintos componentes, requiriéndose servicios de refrigeración en el condensador de la columna de destilación, en el enfriador previo al tanque flash, en el enfriamiento entre etapas de los compresores de CO_2 y H_2 , y el enfriamiento del producto final. En todos estos casos, es posible implementar enfriamiento con aire para reducir el consumo de agua de enfriamiento. Para el presente estudio, al igual que lo detallado para la producción de H_2 , se considera un sistema de enfriamiento de circuito semi-cerrado con torre de enfriamiento, asumiendo las mismas características técnicas ya mencionadas.

Cabe mencionar que la necesidad de contar con compresores de H_2 y CO_2 en la planta de producción de MeOH , así como sus características específicas, dependen de las condiciones en que se suministren estos productos, pudiendo incluso no ser necesarios en estas instalaciones. En el presente estudio se asume que tanto el H_2 como el CO_2 se encuentran en las condiciones en que se obtienen en sus respectivos procesos (electrolisis, y captura y purificación de CO_2 , respectivamente). No obstante, es necesario tener presente que esta compresión se realiza en la planta de MeOH o en sus procesos de origen, y en definitiva, el enfriamiento y el consumo de agua es igualmente necesario.

A continuación se indican las cargas térmicas de los servicios de refrigeración identificados, que requerirían de agua de enfriamiento. Cabe aclarar que estos valores deben ser considerados estimaciones promedio, ya que se basan modelos de bibliografía para casos particulares de una producción media de 100 kton/año de MeOH . Para producciones que difieran significativamente de esta, los valores pueden variar de forma no lineal por verse afectada la integración térmica del sistema.

Servicio de refrigeración	Carga térmica (kWh/kgMeOH)
Enfriamiento entre etapas compresor H_2	0,36
Enfriamiento entre etapas compresor CO_2	0,16
Enfriador previo al tanque flash	0,23
Condensador columna de destilación	0,97
Enfriamiento producto final	0,04
Total	1,76

De esta manera, el calor total que se requiere disipar por el sistema de refrigeración alcanza los 1,76 kWh/kg_{MeOH}. El modelo para determinar la cantidad de agua necesaria supone un sistema similar al desarrollado para la producción de H_2 . En el diagrama a continuación se muestra el sistema simplificado de producción de metanol verde indicando los procesos involucrados y flujos en el suministro de agua.



Fuente: elaboración propia

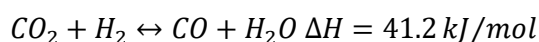
Cabe indicar que no se considera el consumo de agua para la generación de vapor. Se asume que se cuenta con una eficiencia alta de recuperación de condensado, por lo que la reposición de agua es insignificante.

Producción de combustible de aviación

La producción de combustible de aviación verde (e-jet fuel, sustainable aviation fuel (SAF)) se puede realizar vía metanol o directamente a partir de H_2 y CO_2 , siendo esta última la única habilitada de acuerdo a la regulación ASTM (Boilley *et al*, 2024), la cual es analizada en presente estudio. Esta se compone de tres etapas principales: reacción inversa de desplazamiento de agua y gas (Reverse Water Gas Shift, RWGS), reacción de Fischer-Tropsch (FT), y separación de las fracciones por destilación.

El modelo que se desarrolla en el presente estudio se basa en referencias bibliográficas encontradas que simulan la producción de e-jet fuel para un caso en particular (Rojas-Michaga *et al*, 2023).

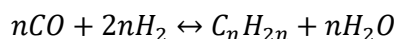
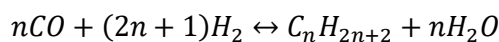
La reacción RWGS consiste en una conversión catalítica de una mezcla de CO_2 y H_2 en un gas de síntesis según la siguiente reacción que se favorece a altas temperaturas:



Mediante reacciones secundarias, se genera metano y carbón, que representan ineficiencias del sistema.

Para llevar a cabo esta reacción se utiliza un reactor de tubos donde se encuentra el catalizador, que son ubicados dentro de un horno, para alcanzar una temperatura entre 700 y 1000 °C. Para aportar el calor necesario, el horno puede utilizar como combustible los hidrocarburos livianos que se generan en el proceso, e incluso puede realizarse una oxidación para aprovechar el O_2 de la electrólisis. La corriente de salida debe ser enfriada y debe instalarse un separador de fases para retirar el agua que pueda desactivar el catalizador de FT.

La reacción de FT produce hidrocarburos a partir del gas de síntesis, obteniendo un producto similar al petróleo.



Las condiciones de operación, la configuración del reactor de FT y el catalizador, tienen diferentes efectos en las propiedades, composición y largo de cadena de los hidrocarburos que se generan. Para maximizar la producción de queroseno (corte necesario para el jet fuel) es importante obtener hidrocarburos de largo de cadena en el rango de los destilados medios, que puede ser logrado ajustando las condiciones de operación del reactor de síntesis a 240 °C y 25 bar, usando catalizador a base de cobalto, utilizando un reactor de lecho fijo. Estas condiciones pueden modificarse con el objetivo de maximizar uno u otro producto, pero el proceso general es el mismo.

La corriente de salida del reactor de FT requiere un proceso adicional para obtener las fracciones comerciales de hidrocarburos, como naftas (C5 a C7), queroseno (C8 a C16) y diésel (C17 a C20). Para ello se utiliza una serie de enfriadores y separadores, obteniendo 3 fases: 1) gas de síntesis sin reaccionar e hidrocarburos livianos, 2) hidrocarburos líquidos, 3) agua condensada. Tanto la fracción de nafta como la de jet fuel, pueden requerir de una unidad adicional de isomerización para aumentar el octanaje del producto y cumplir las especificaciones de los productos comerciales.

Los hidrocarburos líquidos son separados en una columna de destilación atmosférica, siendo la fracción pesada (C21+) posteriormente procesada en un reactor de hidrocracking para incrementar los rendimientos de los destilados medios.

La corriente de hidrocarburos liviana es recirculada a tres etapas del proceso:

- Justo antes del reactor de FT, para asegurar un contenido de inertes de 25 % para la estabilidad térmica del reactor.
- Para generar calor en el reactor de RWGS mediante oxidación, siendo el flue gas enfriado para recuperación de calor. Parte de este gas es mezclado con H₂ y CO₂ fresco para su ingreso al reactor de RWGS.
- El resto de esta corriente es mezclada con H₂ y CO₂ fresco para su ingreso al reactor de RWGS.

De acuerdo a la bibliografía consultada, para maximizar la obtención de jet-fuel, se utiliza una relación CO₂:H₂ en el entorno de 4, a partir del cual se alcanza un rendimiento de 0,75 kg_{jet-fuel}/kg_{H₂}. Los otros productos con valor comercial que se obtienen a través de este proceso son gasolina (0,35 kg_{gasolina}/kg_{jet-fuel}) y diésel (0,32 kg_{diesel}/kg_{jet-fuel}).

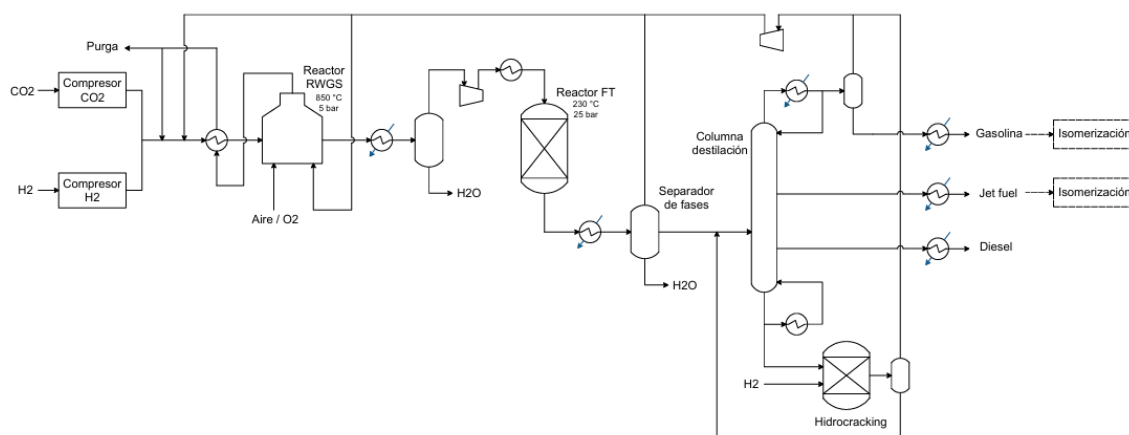
El proceso puede ser integrado térmicamente para maximizar la eficiencia energética de la planta, reduciendo las necesidades de servicios de calor y frío. Como el proceso por sí mismo provee el calor necesario, no es necesaria un servicio adicional de calor.

Al igual que en la producción de metanol, en los procesos de RWGS y FT también se genera agua, como producto de la reacción en una relación aproximada de 4,9 kg_{H₂O}/kg_{jet-fuel}. Esta agua debe ser separada del sistema y puede contener trazas de variedad de sustancias, incluyendo



alcoholes, cetonas, aldehídos, ácidos carboxílicos y componentes inorgánicos, por lo que debe ser tratada si se desea su reutilización.

A continuación se muestra un diagrama de flujos con los procesos principales del sistema de producción de e-jet fuel, basado en simulaciones de referencias bibliográficas que desarrollan y analizan técnica y económicamente el proceso de producción.

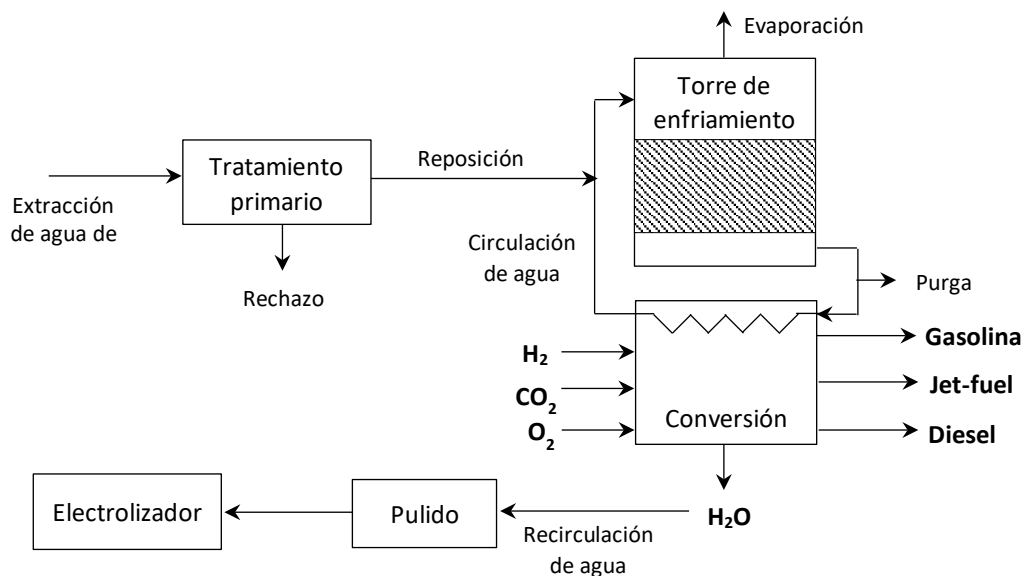


Fuente: adaptado de Rojas-Michaga *et al*, 2023

Como puede observarse, el proceso requiere de varios servicios de refrigeración, entre los que se puede mencionar los dos enfriadores posteriores a los reactores RWGS y FT, el condensador de la columna de destilación y los enfriadores de los productos finales.

Entre estos, de acuerdo a los modelos y balance de energía presentados en las referencias consultadas, las dos cargas térmicas más importantes corresponden a los enfriadores posteriores a los reactores de RWGS y FT, alcanzando valores de 5,21 kWh/kg_{jet-fuel} y 3,64 kWh/kg_{jet-fuel}, respectivamente. Lamentablemente, la información no cuenta con el detalle necesario para determinar si estas cargas refieren a servicios de refrigeración o se encuentran integrados mediante el intercambio de calor con otras corrientes que permitan reducir el requerimiento de agua de enfriamiento. Por ejemplo, el modelo no parece considerar el precalentamiento de las corrientes que ingresan a los reactores u otros servicios, como el reboiler de la columna de destilación. Tampoco se cuenta con datos precisos para determinar el calor a disipar en los otros servicios de refrigeración mencionados.

Por estas razones, no fue posible estimar con precisión el calor a disipar que debería ser incluido en el sistema de refrigeración con agua. No obstante, a continuación se muestra el modelo simplificado para el abastecimiento de agua para el proceso.



Fuente: elaboración propia

Resultados de consumo de agua

A continuación se presentan los resultados obtenidos respecto al consumo de agua en la producción de hidrógeno verde y sus derivados. Para ello fue desarrollado un modelo que simula los procesos involucrados en el abastecimiento y uso de agua en el sistema, de acuerdo a lo especificado en las secciones anteriores.

Cabe aclarar que, si bien los datos para la producción de SAF no pudieron ser verificados y no pueden ser tomados como resultados válidos, los resultados obtenidos son igualmente presentados con el objetivo de contar, al menos, con una primera estimación. En la medida que se genere la información, esta puede ser incorporada en el modelo y corregir los resultados.

Se anexa la planilla de cálculo de Microsoft Excel, permitiendo así el ajuste de los parámetros utilizados según se cuente con datos de mayor precisión. A continuación se resumen todos los parámetros utilizados y los resultados obtenidos en el modelo.



Tratamiento primario:		
Coeficiente de recuperación:		
Agua de mar:	50	%
Agua superficial:	90	%
Agua subterránea:	98	%
Pulido:		
Coeficiente de recuperación:		
	75	%
Torre de enfriamiento:		
Salto térmico:	10	°C
Evaporación:	0,75	% (de la circulación)
Purga:	0,25	% (de la circulación)
Electrolizador:		
Rendimiento estequiométrico:	9	kg_H2O/kg_H2
Eficiencia del uso de agua:	90	%
Energía electrólisis:	39,6	kWh/kg_H2 (Entalpía de formación a 25 °C)
Eficiencia energética electrólisis:		
Alcalino	65	%
PEM	75	%
Conversión metanol:		
Rendimiento estequiométrico:	5,27	kg_MeOH/kg_H2
Eficiencia del uso hidrógeno:	100	% (H2 que efectivamente se transforma)
Requerimiento de CO2:	7,35	kg_CO2/kg_H2
Generación de agua:	0,57	kg_H2O/kg_MeOH
Calor total a disipar:	1,76	kWh/kg_MeOH
Enfriamiento entre etapas compresor H2:	0,36	kWh/kg_MeOH
Enfriamiento entre etapas compresor CO2:	0,16	kWh/kg_MeOH
Enfriador previo al tanque flash:	0,23	kWh/kg_MeOH
Condensador columna de destilación:	0,97	kWh/kg_MeOH
Enfriamiento producto final:	0,04	kWh/kg_MeOH
Conversión SAF:		
Rendimiento estequiométrico:	0,75	kg_jet-fuel/kg_H2
	0,35	kg_gasolina/kg_jet-fuel
	0,32	kg_diesel/kg_jet-fuel
Eficiencia del uso hidrógeno:	100	% (H2 que efectivamente se transforma)
Requerimiento de CO2	4	kg_CO2/kg_H2
Requerimiento de O2	1,9	kg_O2/kg_jet-fuel
Generación de agua:	6,7	kg_H2O/kg_jet-fuel
Calor total a disipar:	8,85	kWh/kg_jet-fuel
Enfriamiento salida RWGS:	5,21	kWh/kg_jet-fuel
Enfriamiento salida FT:	3,64	kWh/kg_jet-fuel
Condensador columna de destilación:	S/D	kWh/kg_jet-fuel
Enfriamiento producto final:	S/D	kWh/kg_jet-fuel

	Fuente de agua	Electrolizador	Recirculación de agua	Consumo de agua total		Consumo de agua refrigeración		Consumo de agua conversión	
				(kg _{H2O} /kg _{H2})	(kg _{H2O} /kg _{UP})	(kg _{H2O} /kg _{H2})	(kg _{H2O} /kg _{UP})	(kg _{H2O} /kg _{H2})	(kg _{H2O} /kg _{UP})
Producción H ₂	Mar	Alc		63		36,7			
		PEM		49		22,7			
	Superficial	Alc		35		20,4			
		PEM		27		12,6			
	Subterránea	Alc		32		18,7			
		PEM		25		11,6			
Producción MeOH	Mar	Alc	NO	79	15,0	52,6	10,0	16	3,0
			SI	73	13,9				
			NO	65	12,4	38,7	7,3		
		PEM	SI	59	11,3				
	Superficial		NO	44	8,4	29,2	5,5	8,9	1,7
		Alc	SI	41	7,7				
			NO	36	6,9	21,5	4,1		
		PEM	SI	33	6,3				
	Subterránea		NO	40	7,7	26,9	5,1	8,1	1,5
		Alc	SI	37	7,1				
			NO	33	6,3	19,7	3,7		
		PEM	SI	30	5,7				
Producción SAF	Mar	Alc	NO	75	99,7	48,1	64,1	11,4	15,2
			SI	65	86,3				
			NO	61	81	34,1	45,5		
		PEM	SI	51	67,6				
	Superficial		NO	42	55,4	26,7	35,6	6,3	8,5
		Alc	SI	36	47,9				
			NO	34	45	19	25,3		
		PEM	SI	28	37,6				
	Subterránea		NO	38	50,9	24,5	32,7	5,8	7,8
		Alc	SI	33	44				
			NO	31	41,4	17,4	23,2		
		PEM							



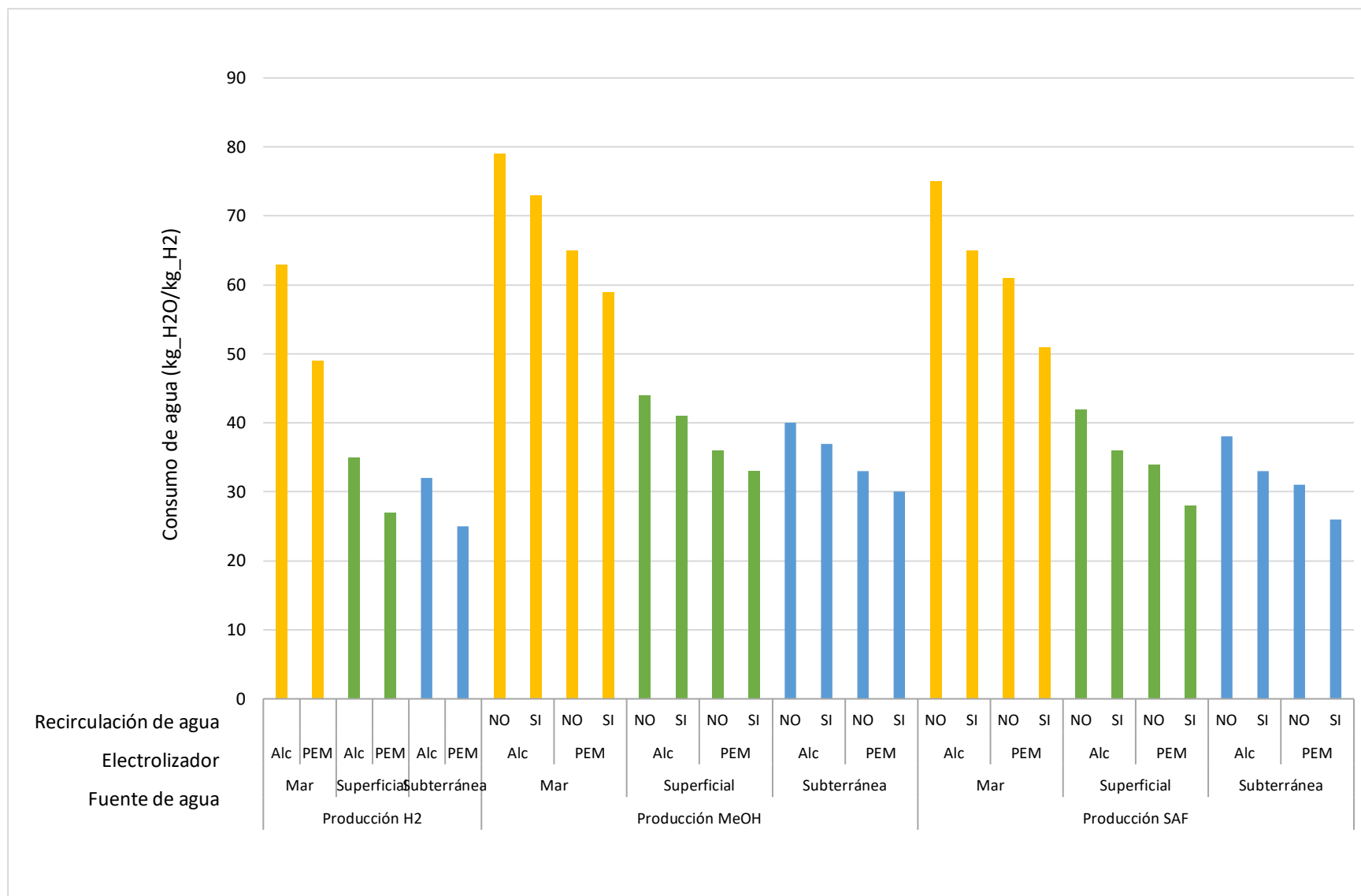
Ministerio
de Industria,
Energía y Minería



BID

Banco Interamericano
de Desarrollo

	SI	26	34,5	
--	----	----	------	--



Si bien se presentan los resultados correspondientes al uso de agua de mar en la producción de hidrógeno verde y sus derivados, estos son excluidos del análisis, ya que esta fuente no representaría un problema respecto a su disponibilidad. Debido a los problemas ya mencionados en cuanto a la información disponible para la producción de SAF, los resultados correspondientes tampoco son considerados en el análisis.

A partir de los resultados obtenidos, el consumo de agua para la producción de hidrógeno verde se encuentra entre **25 y 35 $\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{kg}_{\text{H}_2}$** , de los cuales entre 12 y 20 $\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{kg}_{\text{H}_2}$ corresponden a agua de enfriamiento (46 – 58 %). Estos valores coinciden aproximadamente con los presentados en referencias bibliográficas consultadas (IRENA, 2023).

Como se observa, el consumo de agua muestra una alta sensibilidad a la tecnología del electrolizador, pudiendo reducir los requerimientos de agua de enfriamiento en hasta un 38 % en el pasaje de un electrolizador Alcalino a uno PEM.

Otro factor que tiene una muy alta sensibilidad en el consumo de agua del sistema corresponde al nivel de reposición de agua a la torre de enfriamiento, el cual depende de las condiciones atmosféricas, que afectan la evaporación en la torre, y las características del agua de reposición, que influye en los requerimientos de purga. Para los resultados indicados fue utilizado un nivel de reposición del 1 % respecto a la circulación de agua (0,75 % por evaporación y 0,25 % debido a la purga); pero si esta aumenta al 1,5 %, el consumo de agua de enfriamiento puede aumentar hasta en un 50 %.

En cuanto a la producción de metanol, el consumo total de agua se encuentra entre **30 y 44 $\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{kg}_{\text{H}_2}$** (6 – 8 $\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{kg}_{\text{MeOH}}$), de los cuales entre 20 y 29 $\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{kg}_{\text{H}_2}$ (4 – 6 $\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{kg}_{\text{MeOH}}$) corresponden a agua de enfriamiento (60 – 67 %); y solo entre 8 y 9 $\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{kg}_{\text{H}_2}$ (2 $\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{kg}_{\text{MeOH}}$) es agua de enfriamiento del proceso de conversión (20 %).

Como era de esperar, en la producción de metanol, el efecto de cambio de la tecnología de electrólisis muestra un efecto menor en términos relativos, ya que se reduce en no más del 26 % el consumo de agua de enfriamiento tras el pasaje de un electrolizador alcalino a uno PEM.

Por su parte, se observa que la recuperación y reutilización del agua generada en los procesos de conversión presenta un efecto menor en el consumo de agua del sistema, ya que solo permitiría una reducción menor al 10 % en relación al escenario sin recirculación.

Por último, de acuerdo al modelo desarrollado se observa una sensibilidad moderada del consumo de agua total en relación a los coeficientes de recuperación considerados en el tratamiento del agua (tratamiento primario y pulido). A modo de ejemplo, para la producción de hidrógeno a partir de agua subterránea, reducir el coeficiente de recuperación de agua en el tratamiento primario de 98 a 90 %, aumenta el consumo total de agua entre un 8 y 9 %; mientras que reducir el coeficiente de recuperación del pulido de 75 a 69 % genera un aumento entre el 4 y 6 % del consumo total de agua.



En la tabla a continuación se resumen los rangos de consumo de agua, de acuerdo a los resultados obtenidos.

	Consumo de agua total		Consumo de agua refrigeración		Consumo de agua conversión	
	(kg _{H2O} /kg _{H2})	(kg _{H2O} /kg _{UP})	(kg _{H2O} /kg _{H2})	(kg _{H2O} /kg _{UP})	(kg _{H2O} /kg _{H2})	(kg _{H2O} /kg _{UP})
Producción H ₂	25 - 35		12 - 20			
Producción MeOH	30 - 44	6 - 8	20 - 29	4 - 6	8 - 9	2

Conclusiones

En primer lugar es necesario resaltar la importancia de profundizar en los procesos de producción de hidrógeno verde y sus derivados, que permitan ampliar el conocimiento y comprender como los distintos aspectos influyen en el desempeño del sistema. En particular, la estimación del consumo de agua requiere de la modelación de los procesos para determinar cómo se produce el consumo de agua, cuales son los principales aspectos que influyen y, a partir de ello, buscar las posibles alternativas para minimizarlo.

En este sentido, se considera que el modelo desarrollado puede representar un aporte de interés para avanzar en esta línea. Este modelo deja todos los datos abiertos, de forma que a medida que los distintos parámetros sean determinados con mayor precisión, los resultados puedan ser ajustados.

En cuanto al consumo de agua en los procesos de producción de hidrógeno verde y sus derivados, se destaca el peso relativo que tiene la refrigeración de los procesos en el consumo total de agua. Dado que la otra parte del agua es consumida como materia prima en la producción de hidrógeno, las oportunidades de minimización en el consumo de agua deben enfocarse en la optimización de los servicios de refrigeración.

En este sentido se identifican dos posibles alternativas, que merecen un mayor análisis para evaluar su viabilidad. Por un lado, maximizar la integración térmica de los procesos, es decir, aprovechar los flujos de calor entre los procesos unitarios del sistema, con el objetivo de disminuir los requerimientos de servicios auxiliares (vapor y agua de enfriamiento). Por ejemplo, como fue indicado en la descripción de la producción de metanol, la salida del reactor es utilizada para precalentar la corriente de ingreso.

Esta integración térmica también puede darse entre distintos eslabones de la cadena. Por ejemplo, la captura y purificación del CO₂ requiere calor en el proceso de desorción, pudiendo ser aportado por otros procesos, como puede ser el calor a disipar del electrolizador. No obstante, la integración térmica entre distintos eslabones requiere que estos sean desarrollados en el mismo lugar para que exista esta posibilidad.

Por otro lado, una alternativa que requiere ser evaluada en mayor profundidad para analizar su factibilidad, corresponde a la implementación de refrigeración con aire, con el respaldo de refrigeración con agua. Si bien esta opción tiende a ser más costosa en su instalación y operación, la reducción del consumo de agua puede ser muy importante, pudiendo incluso no ser necesaria en gran parte del año.

De acuerdo a comentarios recibidos por técnicos vinculados a una industria con una ingeniería similar a lo que podría implementarse en este sector, la refrigeración con aire es viable en nuestro país y en general más sostenible.

Por otro lado, en cuanto a la recuperación y recirculación del agua formada en la conversión del hidrógeno en derivados (metanol e hidrocarburos), si bien no representa una reducción muy significativa de la extracción de agua de la fuente, esta evita la necesidad de disponer de esa agua como un efluente que puede contener niveles apreciables de distintos contaminantes. No obstante, esta agua presenta muy bajas concentraciones de sólidos disueltos y conductividad eléctrica, por lo que podría resultar atractivo su alimentación al electrolizador. El tratamiento necesario para eliminar los contaminantes podría consistir en filtros de adsorbente, como carbón activado.

Por último, dado que no fue posible conseguir información precisa y confiable respecto a la producción de jet-fuel u otros hidrocarburos, se considera necesario continuar avanzando en este sentido para profundizar el conocimiento de los procesos involucrados que permita realizar mejores estimaciones del consumo de agua esperable en este tipo de procesos.

Referencias

Boilley, J.H., Berrady, A., Bin Shahrel, H., Gürbüz, E., Gallucci, F., (2024). *Energy analysis of a power-to-jet-fuel plant*. International Journal of Hydrogen Energy. N° 58, p. 1160-1176.

Inter-American Development Bank (IDB), (2023). *Environmental, Health, Safety, and Social Management of Green Hydrogen in Latin America and the Caribbean: A scoping study*. Energy Division Environmental and Social Solutions Unit. Technical note N° IDB-TN-2554.

International Renewable Energy Agency (IRENA), (2020). *Green Hydrogen Cost Reduction: Scaling up Electrolysers to Meet the 1.5°C Climate Goal*. ISBN: 978-92-9260-295-6.

International Renewable Energy Agency (IRENA), (2023). *Water for hydrogen production*. ISBN: 978-92-9260-526-1.

Rojas-Michaga, M.F., Hughes, K.J., Ingham, D., Michailos, S., Cardozo, E., Pourkashanian, M., (2023). *Sustainable aviation fuel (SAF) production through power-to-liquid (PtL): A combined techno-economic and life cycle assessment*. Energy Conversion and Management. Vol. 292, n° 117427.

Sollai, S., Porcu, A., Tola, V., Ferrara, F., Pettinau, A., (2023). *Renewable methanol production from green hydrogen and captured CO₂: A techno-economic assessment*. Journal of CO₂ Utilization, vol. 68, n° 102345.

Spang, E.S., Moomaw, W.R., Gallagher, K.S., Kirshen, P.H., Marks, D.H., (2014). *The water consumption of energy production: an international comparison*. Environmental Research Letters, vol. 9, n° 105002.

Vaquerizo, L., Kiss, A., (2023). *Thermally self-sufficient process for cleaner production of e-methanol by CO₂ hydrogenation*. Journal of Cleaner Production, vol. 433, n° 139845.