

CÁTEDRA
RAFAEL MARIÑO
DE NUEVAS TECNOLOGÍAS
ENERGÉTICAS



CÁTEDRA
DE TRANSICIÓN
ENERGÉTICA



DESCARBONIZACIÓN MEDIANTE GASES RENOVABLES PROCEDENTES DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS

José Ignacio Linares

Director de la Cátedra Fundación Repsol de Transición Energética (Comillas – ICAI)

Investigador de la Cátedra Rafael Mariño de Nuevas Tecnologías Energéticas

comillas.edu

Hidrógeno verde: no sólo electrólisis

Green hydrogen can be created by the following methods:

1. Electrolysis of water with renewable energy
2. Steam methane reformation (SMR) of biogas
3. Thermal conversion or gasification of organic matter and other waste streams

DEFINITION:

GREEN HYDROGEN [grēn hahy-druh-juhn]

noun

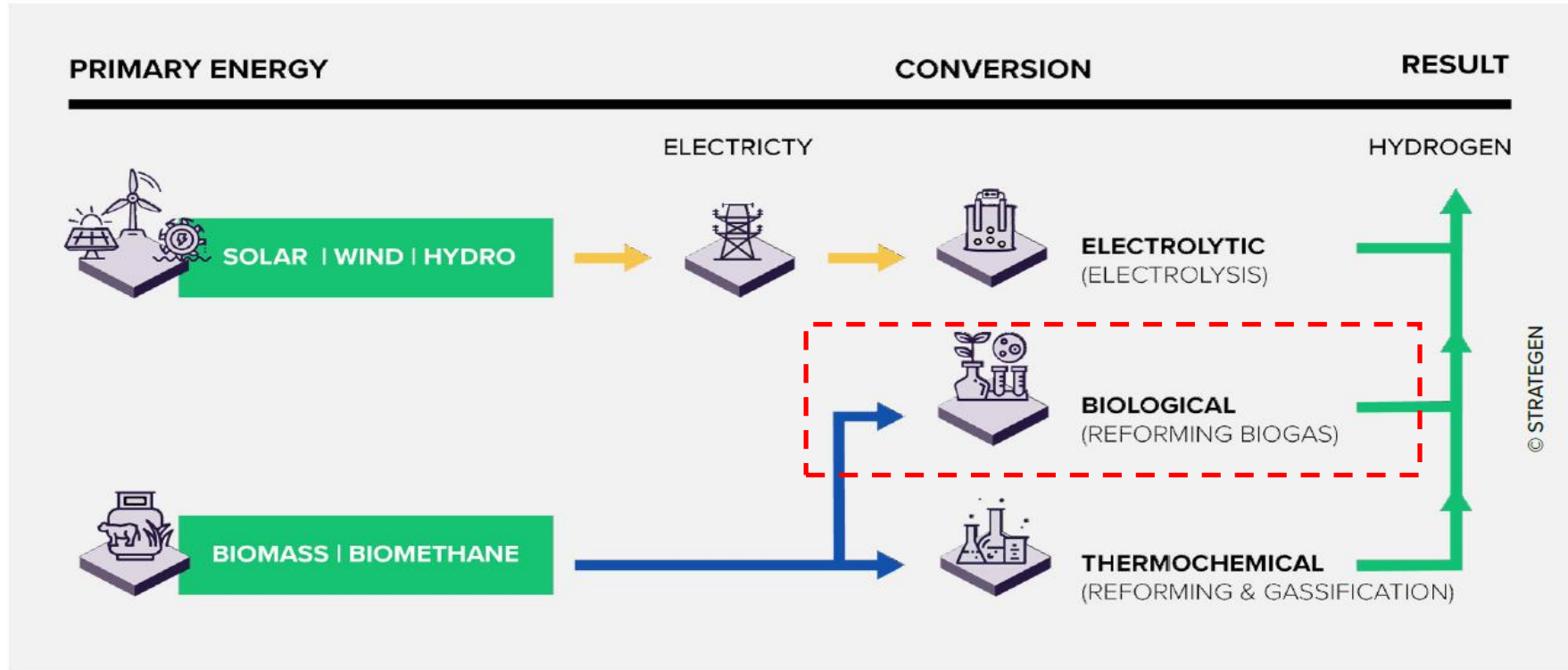
¹ hydrogen created from renewable energy sources such as solar, wind, hydro power, biomass, biogas, or municipal waste.

[[Nelson, Lin, et al, Green Hydrogen Guidebook, Green Hydrogen Coalition, August 2020](#)]



Hidrógeno verde: no sólo electrólisis

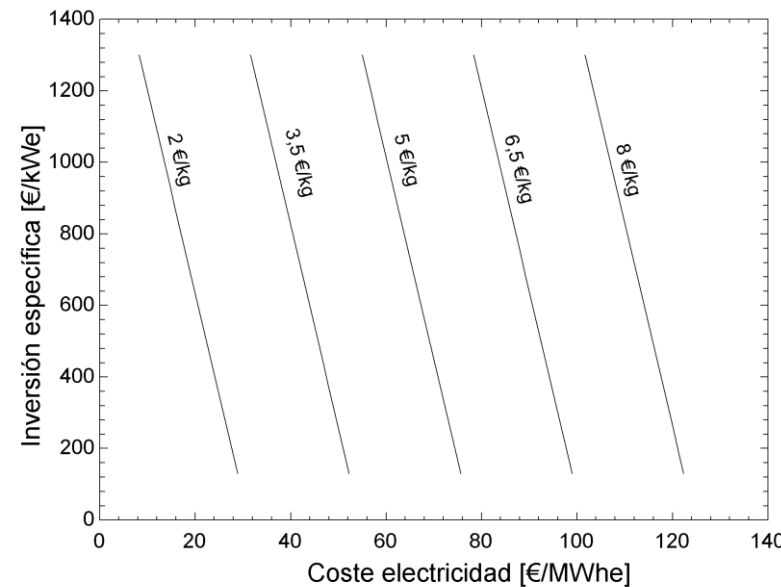
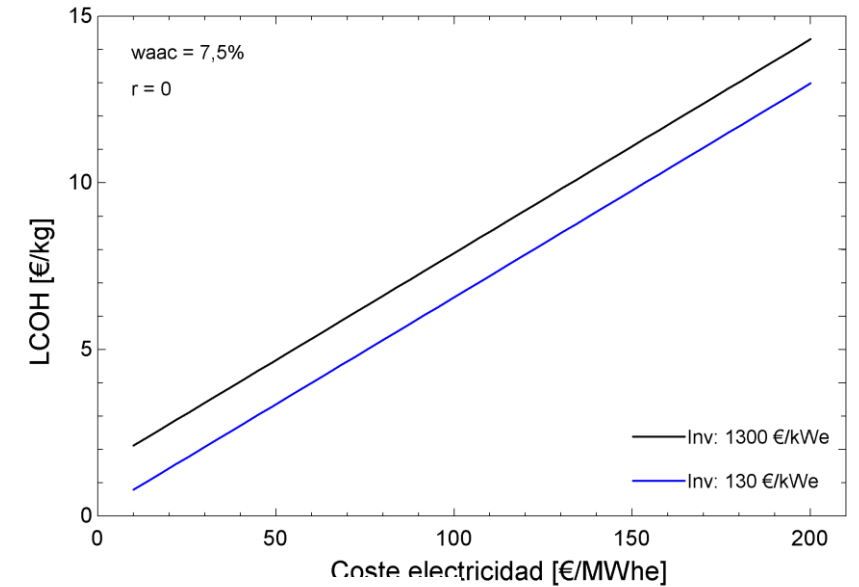
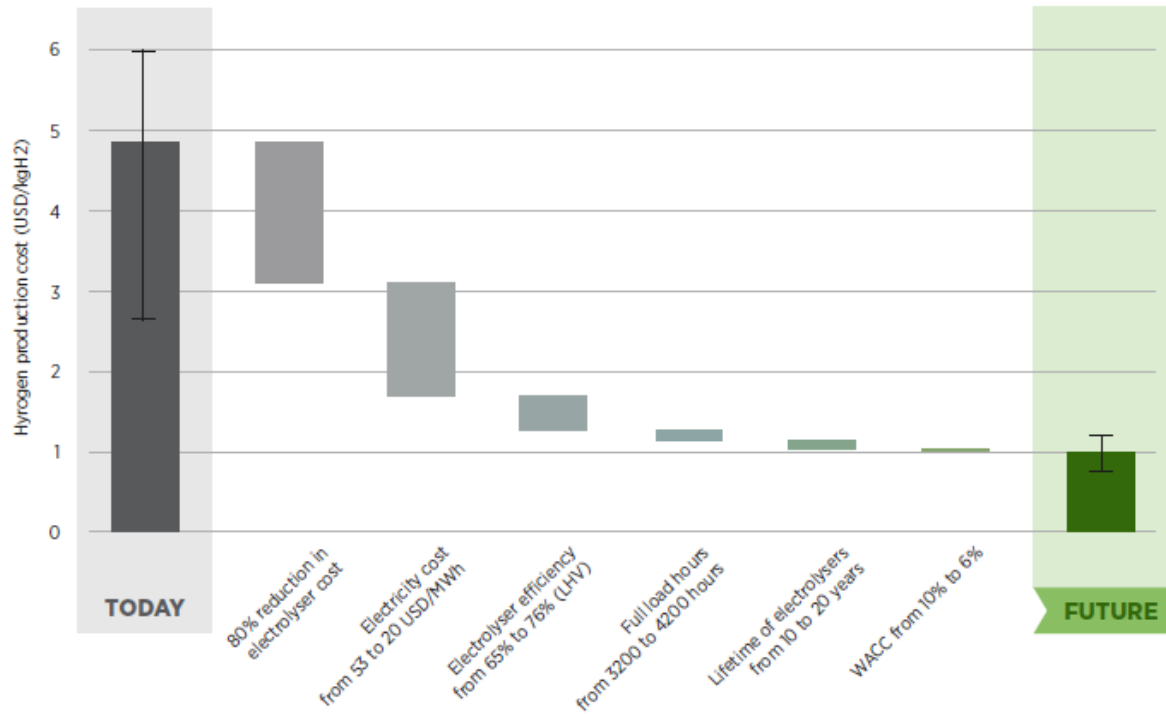
ILLUSTRATION OF THE OFFICIAL GHC DEFINITION OF GREEN HYDROGEN



[Nelson, Lin, et al, Green Hydrogen Guidebook, Green Hydrogen Coalition, August 2020]

Electrólisis renovable

Figure ES1. A combination of cost reductions in electricity and electrolysers, combined with increased efficiency and operating lifetime, can deliver 80% reduction in hydrogen cost.

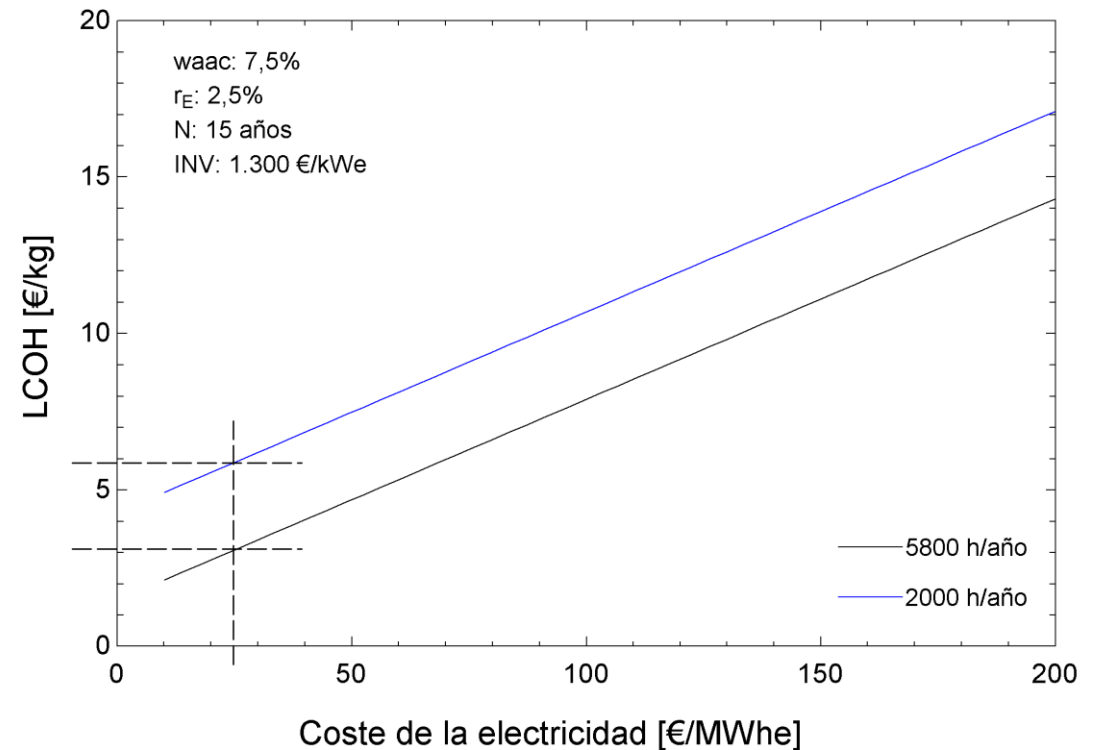


Electrólisis renovable

Table ES1. Key performance indicators for four electrolyser technologies today and in 2050.

	2020				2050			
	Alkaline	PEM	AEM	SOEC	Alkaline	PEM	AEM	SOEC
Cell pressure [bara]	< 30	< 70	< 35	< 10	> 70	> 70	> 70	> 20
Efficiency (system) [kWh/KgH ₂]	50-78	50-83	57-69	45-55	< 45	< 45	< 45	< 40
Lifetime [thousand hours]	60	50-80	> 5	< 20	100	100-120	100	80
Capital costs estimate for large stacks (stack-only, > 1 MW) [USD/kW _a]	270	400	-	> 2 000	< 100	< 100	< 100	< 200
Capital cost range estimate for the entire system, >10 MW [USD/kW _a]	500-1000	700-1400	-	-	< 200	< 200	< 200	< 300

- Hidrógeno verde en valor neto
- Potencia parque renovable \approx 3 veces potencia electrolizador
- Tecnología actual (PEMEC): 58 kWh/kg \Rightarrow 58 MW / 1 (kg/h)
- Mayores costes operación en isla: ¿eólica off-shore?



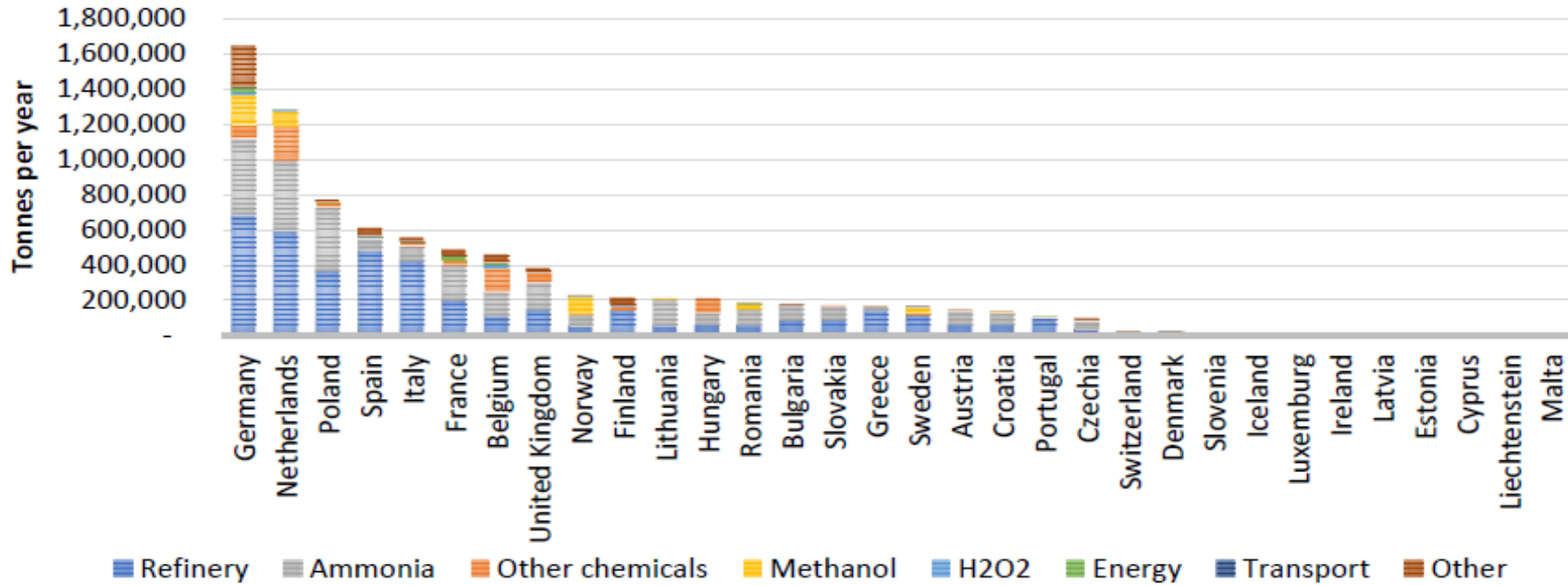
Electrólisis renovable

DEMANDA Y PREVISIONES HOJA DE RUTA EN ESPAÑA

- Consumo España actual: 600.000 ton/año
- Hoja de ruta: 4 GW en 2030 (400.000 ton/año)

[\[MITECO, Hoja de ruta del hidrógeno renovable, 2020\]](#)

Figure 17. Total demand for hydrogen in 2019 by country



Refinery Ammonia Other chemicals Methanol H2O2 Energy Transport Other

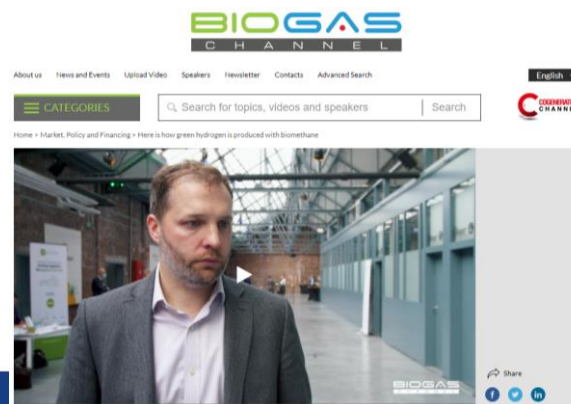


Hidrógeno por SMR desde biometano

- La electrólisis con renovables no es la única forma de producir hidrógeno verde
- El biometano es un gas renovable que se produce a partir de biogás, tras un proceso de *upgrading* y es indistinguible del gas natural
- El biogás procede de residuos: RSU, lodos de EDAR, residuos ganaderos y agrícolas, agroindustrias...
- Si se captura el CO₂ liberado se obtendrían emisiones negativas
- **Hidrógeno dorado** = Hidrógeno verde – captura de CO₂

[Linares, Moratilla, Arenas, VIII Congreso de Ingenieros de ICAI, 2021]

[Bayo Tech presenta un reformador para RSU con bajas producciones; omenta las emisiones negativas al capturar el CO₂]



[PV Magazine, Febrero 2022]

Repsol produce hidrógeno a partir de biometano en una refinería española

UPSTREAM ONLINE / 05 OCTUBRE 2021



[Upstream Online, 5/10/2021]

Primer millón de euros público para la planta de hidrógeno en Gipuzkoa

Con esta subvención se pondrá en marcha el proyecto piloto de producción de hidrógeno para el transporte público a partir de biorresiduos generados en un planta de biometanización.

FEBRERO 7, 2022 LUISA CABELLO

EV HIDRÓGENO TECNOLOGÍA E+D ESPAÑA PAIS VASCO



Imagen: Univergy

Hidrógeno verde desde RSU

Rendimiento

- 485,9 kg RSU/pax-año
- Fracción orgánica de os RSU (FORSU): 59,1%
- 100 Nm³ biogás/ton FORSU
- Contenido de CH₄ del biogás: 65% volumen
- Fase posterior de *upgrading* para pasar de biogás a biometano

SMR: Reformado de biometano (sin captura de CO₂)

$$\left(\frac{1 \text{ ton RSU}}{0,591 \text{ ton FORSU}} \right) \cdot \left(\frac{\text{ton FORSU}}{100 \text{ Nm}^3 \text{ biogás}} \right) \cdot \left(\frac{100 \text{ Nm}^3 \text{ biogás}}{65 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4} \right) \cdot \left(\frac{1 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4}{9,92 \text{ kWh CH}_4} \right) \cdot \left(\frac{100 \text{ kWh CH}_4}{75,9 \text{ kWh H}_2} \right) \cdot \left(\frac{33,6 \text{ kWh H}_2}{1 \text{ kg H}_2} \right) \cdot \left(\frac{1000 \text{ kg H}_2}{1 \text{ ton H}_2} \right) = 116 \text{ ton RSU/ton H}_2$$

Si se emplea gasificación se aumenta la eficiencia (10 a 30 ton RSU/ton H₂)

Hidrógeno dorado desde RSU Potencial

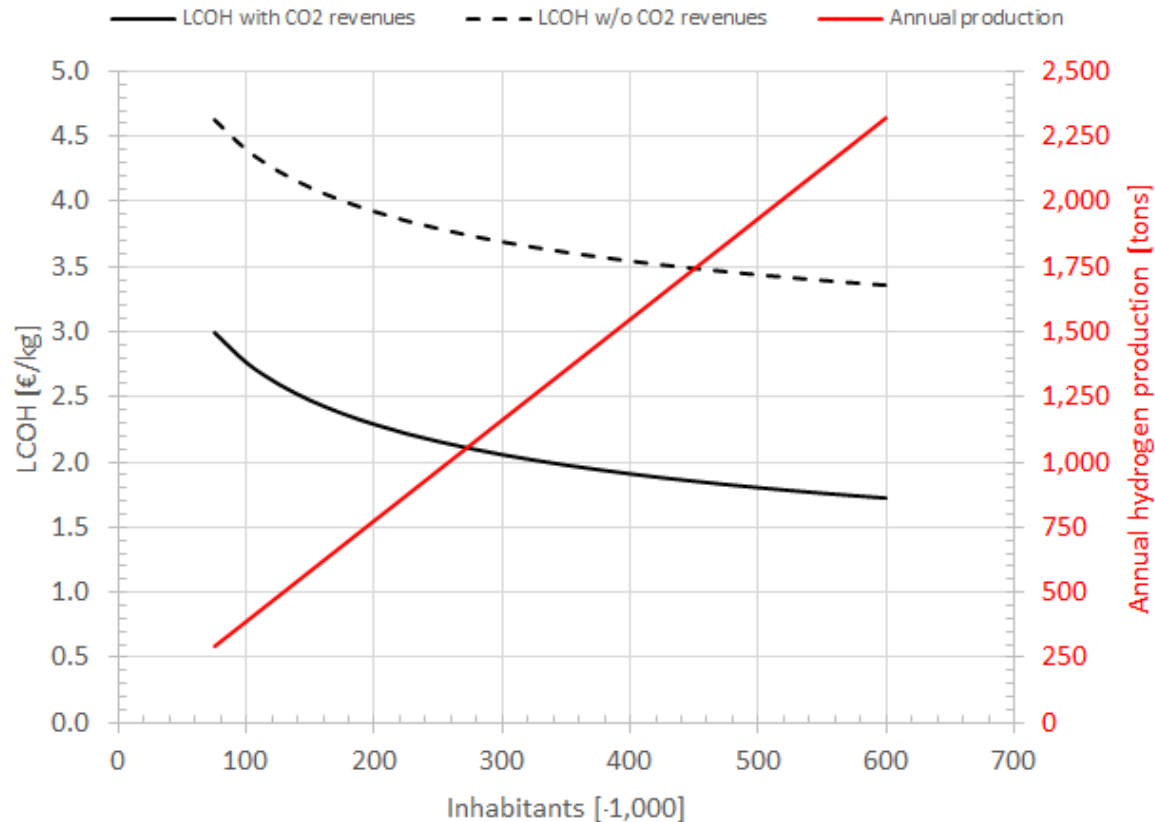
- Producción H₂ por SMR: 2,285 kmol H₂/kmol CH₄ (69,1% de eficiencia)
- Producción de hidrógeno: **3,81 kg/pax-año**
- Producción de CO₂: ≈ 9,63 kg CO₂/kg H₂ (capturado 90%: **8,67 kg CO₂/kg H₂**)
- Capacidad de producción a partir de FORSU: 3,81 kg H₂/pax-año
 - Población España: 47,35 Mpax
 - Producción a partir de FORSU en España: 180.404 ton/año (**30 % demanda actual**)
 - Equivalencia en electrólisis (5.800 heq/año): 1.804 MW = 1,8 GW (**45% de los 4 GW** previstos en 2030 por Hoja de Ruta España)



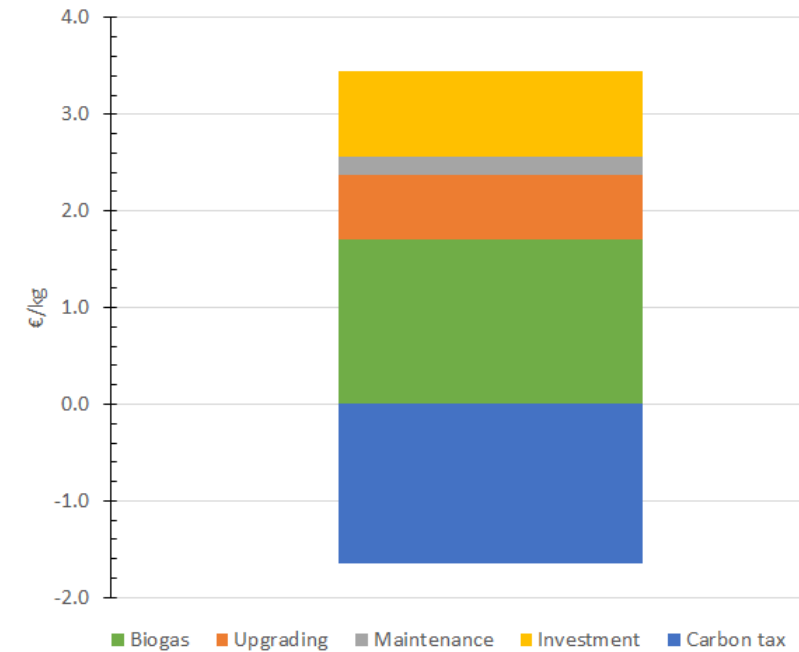
Hidrógeno dorado desde RSU

Costes

SMR con captura



- 25 años de vida
- wacc: 8%
- r: 0% (8% para CO₂)
- Biogás a 35 €/MWh
- CO₂: 80 €/ton



500.000 habitantes ≈ 2.000 ton/año
(20 MWe de electrolizador en red)

500.000 habitantes

ESCENARIOS CONSIDERADOS

- Venta a otra instalación de los derechos, en un mercado ETS renovado
- Coste bruto (sin venta de derechos), sólo compensación de emisiones a nivel estadístico

Hidrógeno dorado desde RSU Almacenamiento de CO₂

- Existen en España 11 almacenamientos geológicos de CO₂ identificados (BOE de [8 de febrero](#) y [3 de abril](#) de 2008), con capacidad entre 500 y 15.000 Mtons
- Una central de carbón de 500 MWe operando 4.000 h/año produce 1,7 Mton CO₂/año
- La producción de hidrógeno dorado a partir de todos los RSU de España produciría 1,56 Mton/año:
 - Comparable a 1 sola central de carbón
 - Capacidad el en peor de los casos para 320 años
- Existen otras posibilidades de almacenar ese CO₂:
 - Polímeros circulares (retirado de la atmósfera)
 - E-fuels (devuelto a la atmósfera, combustible neutro en CO₂)
 - Carbonatos (áridos para construcción)
 - Usos industriales (retirado o neutro, según el uso)



Hidrógeno dorado desde RSU

Aplicación al transporte

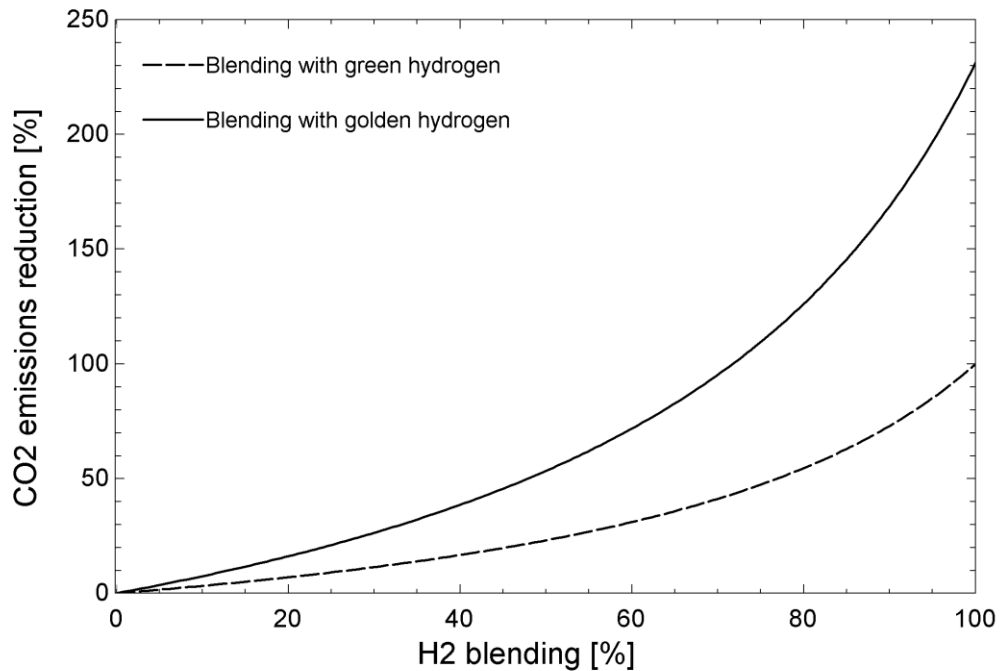
Autobuses urbanos en Madrid capital

- Consumo medio de un autobús con FC: 12 kg H₂/100 km
- 212 líneas con 2049 autobuses (2018)
- 100.475.572 km/año (49.036 km/año-bus)
- Requieren **12.057 Tm H₂/año** (electrolizador 120 MW)
- 3.334.730 habitantes de Madrid producirían **12.705 Tm H₂/año**
- Un autobús con FC:
 - Rendimiento respecto a biometano: $0,7 \cdot 0,5 = 35\%$
 - Rendimiento de un bus con ICE (biometano): 25%
 - Evita las emisiones del autobús original
 - Compensa las emisiones de 10 coches ICE (95 g CO₂/km)

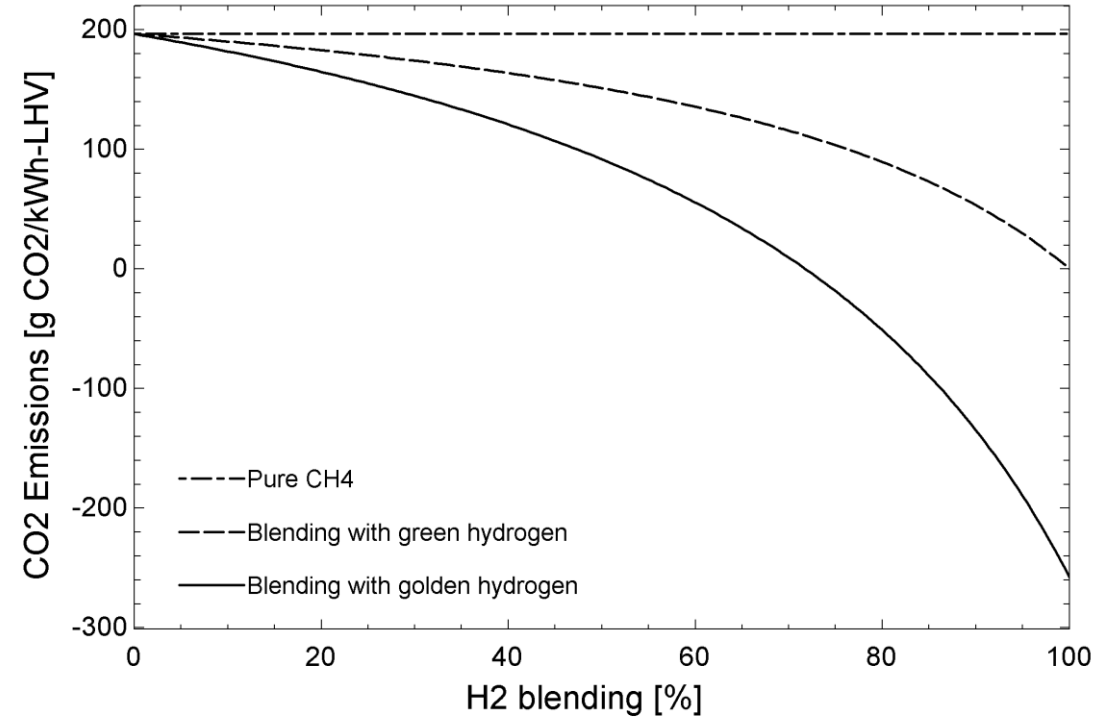


Hidrógeno dorado desde RSU

Aplicación al *blending*



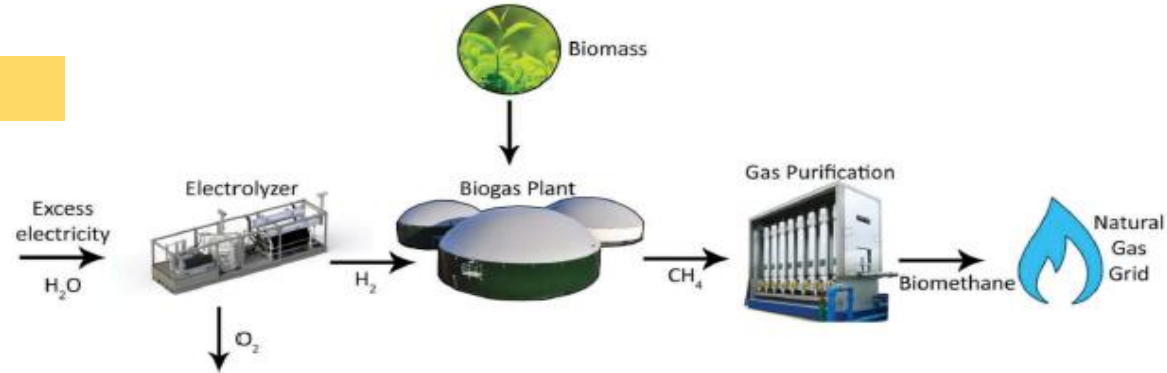
- El hidrógeno verde (electrolítico o SMR de biometano sin captura) es neutro en CO₂
- El hidrógeno dorado presenta emisiones negativas (concepto BECCS)



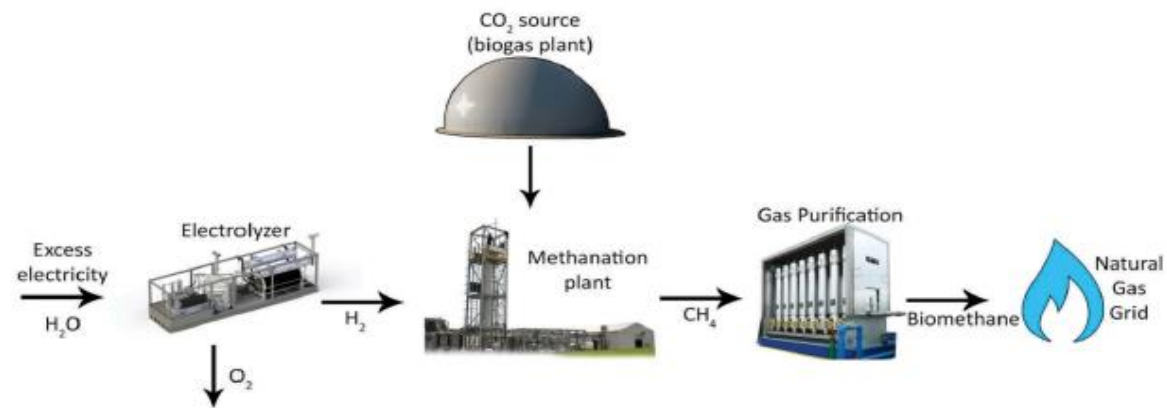
- Las emisiones negativas sirven para compensar emisiones inevitables de otras instalaciones (> 72%)
- Permiten mejorar los números del *blending*

Power to gas (P2G) Biometanización

- In-situ genera problemas de competencia entre bacterias
- Ex-situ exige más I+D para ajustar los diferentes parámetros



In-situ biological H₂ methanation schematic.



Ex-situ biological H₂ methanation schematic.

[[Rusmanis et al., Biological hydrogen methanation systems – an overview of design and efficiency, Bioengineered 10 \(2019\) 604-634](#)]



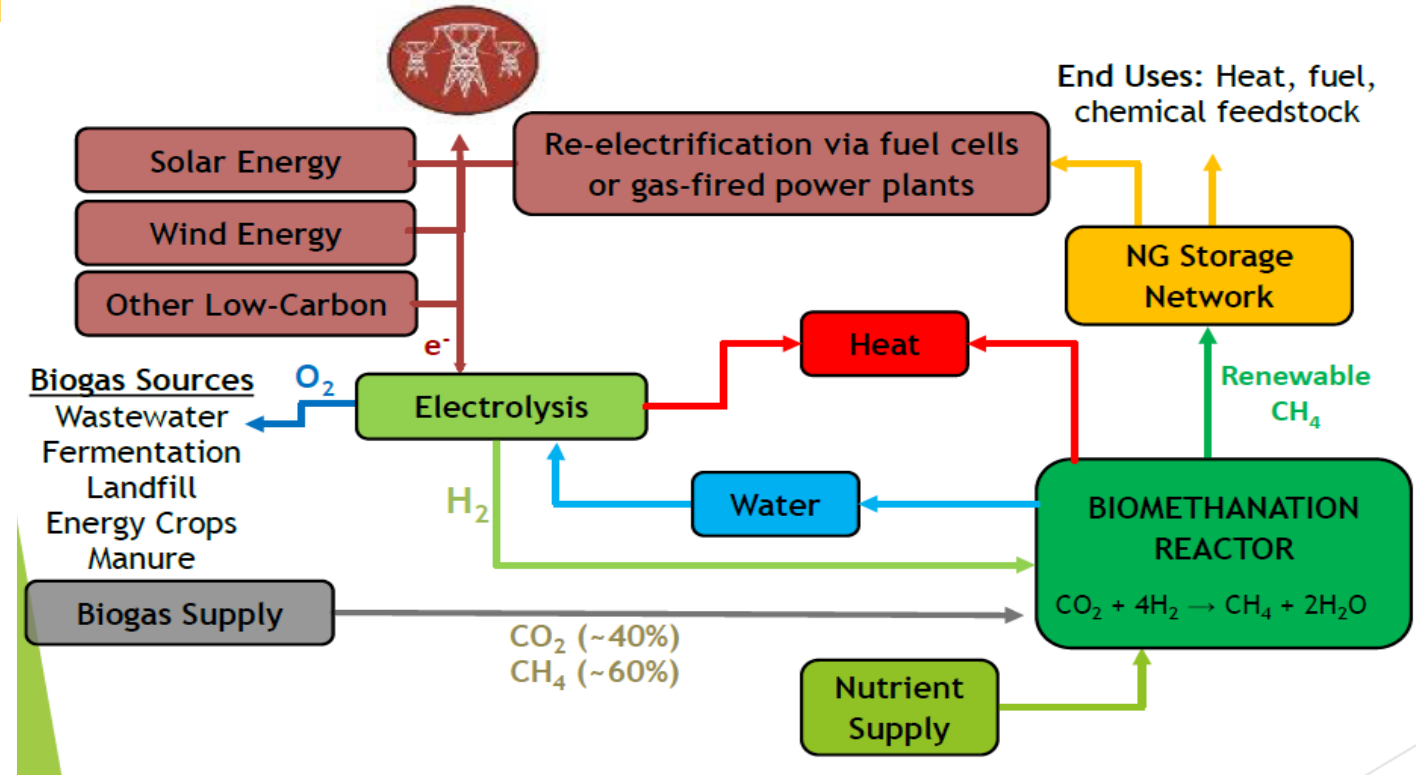
Power to gas (P2G) Biometanización

[Harrison, Dowe, Power to gas. Biomethanation: A unique and sustainable approach to renewable natural gas and other product, NREL, 2019]



Waste-to-Energy: Biogas Sources of CO₂

- Electrólisis:
 - 50 a 55 kWh para 1 kg H₂
 - 1 MWe ≈ 16,7 kg/h H₂
- Biogás: (65% CH₄ y 35% CO₂)
 - 133,6 Nm³/h de biogás
 - 46,8 Nm³/h de CO₂
 - 86,8 Nm³/h de CH₄
- Biometanización:
 - Para 1 MWe de electrolizador:
 - 46,8 Nm³/h CH₄ producido
 - 86,8 Nm³/h CH₄ inicial
 - 92 kg/h CO₂ reciclado



$$\frac{(46,8 + 86,8)(Nm^3/h) \cdot 10 kWh/Nm^3}{1000 kW} = 1,336$$

$$\frac{(46,8 + 86,8)(Nm^3/h) \cdot 10 kWh/Nm^3}{(1000 + 86,8 \cdot 10) kW} = 0,715$$

CONCLUSIONES

- El hidrógeno verde no se obtiene sólo de la electrólisis renovable
- Los residuos pueden complementar la producción electrolítica de hidrógeno renovable
- La captura de CO₂ que habilita la tecnología SMR de biometano permite compensar emisiones de CO₂ inevitables, lo que no logra la electrólisis renovable
- Buena adaptación del hidrógeno de RSU para el transporte
- Mejora de las prestaciones del *blending* con el hidrógeno dorado
- Alternativa: P2G con biometanización, usando el CO₂ del biogás para producir biometano: la producción del biometano aumenta hasta un 54%



REFERENCIAS

- [Linares, J.I. \(2021\), Producción de hidrógeno renovable: combinar electrólisis y residuos orgánicos para acelerar la Transición energética, RETEMA 235 Noviembre-Diciembre](#)



CÁTEDRA
RAFAEL MARIÑO
DE NUEVAS TECNOLOGÍAS
ENERGÉTICAS



CÁTEDRA
DE TRANSICIÓN
ENERGÉTICA



Gracias por su atención

linares@comillas.edu

www.comillas.edu/catedra-rafael-marino

www.comillas.edu/cfrte

comillas.edu

