

XXII Edición Semana de la Ciencia y la Innovación. Comunidad de Madrid

La basura como fuente de hidrógeno.
Descarbonización de los autobuses urbanos
en la ciudad de Madrid

Dr. José Ignacio Linares

Director de la Cátedra Fundación Repsol de Transición Energética

Dra. Eva Arenas

Directora de la Cátedra Rafael Mariño de Nuevas Tecnologías Energéticas

LA ELECTRÓLISIS EN LA HISTORIA

¿Qué es lo que van a quemar en lugar de carbón? Agua, respondió Pencroft. **El agua, descompuesta en sus elementos por la electricidad.** Sí, amigos míos, creo que algún día se empleará el agua como combustible, que el hidrógeno y el oxígeno de los que está formada, usados por separado o de forma conjunta, proporcionarán una fuente inagotable de luz y calor. **El agua será el carbón del futuro.**

Julio Verne “La isla misteriosa” (1874)

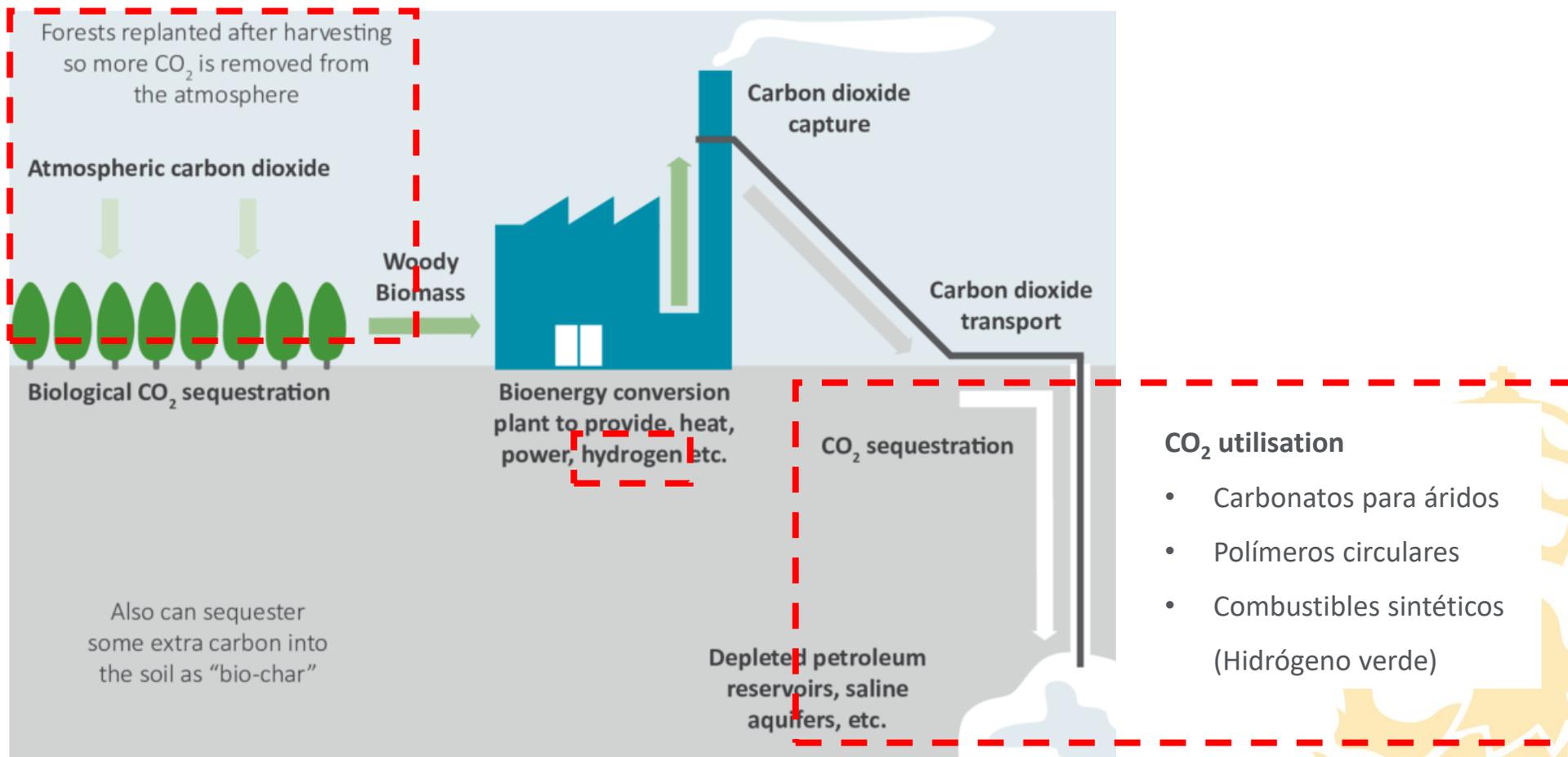


EL BIOGÁS EN LA HISTORIA

- En el 3000 a. de C. se describe cómo los sumerios realizaban limpieza de residuos orgánicos de forma anaeróbica.
- En el 1000 a. de C. los asirios usaban biogás para el calentamiento de las termas.

[\[Bioenergía. Gases renovables- futurenviro Julio-Septiembre 2022\]](#)

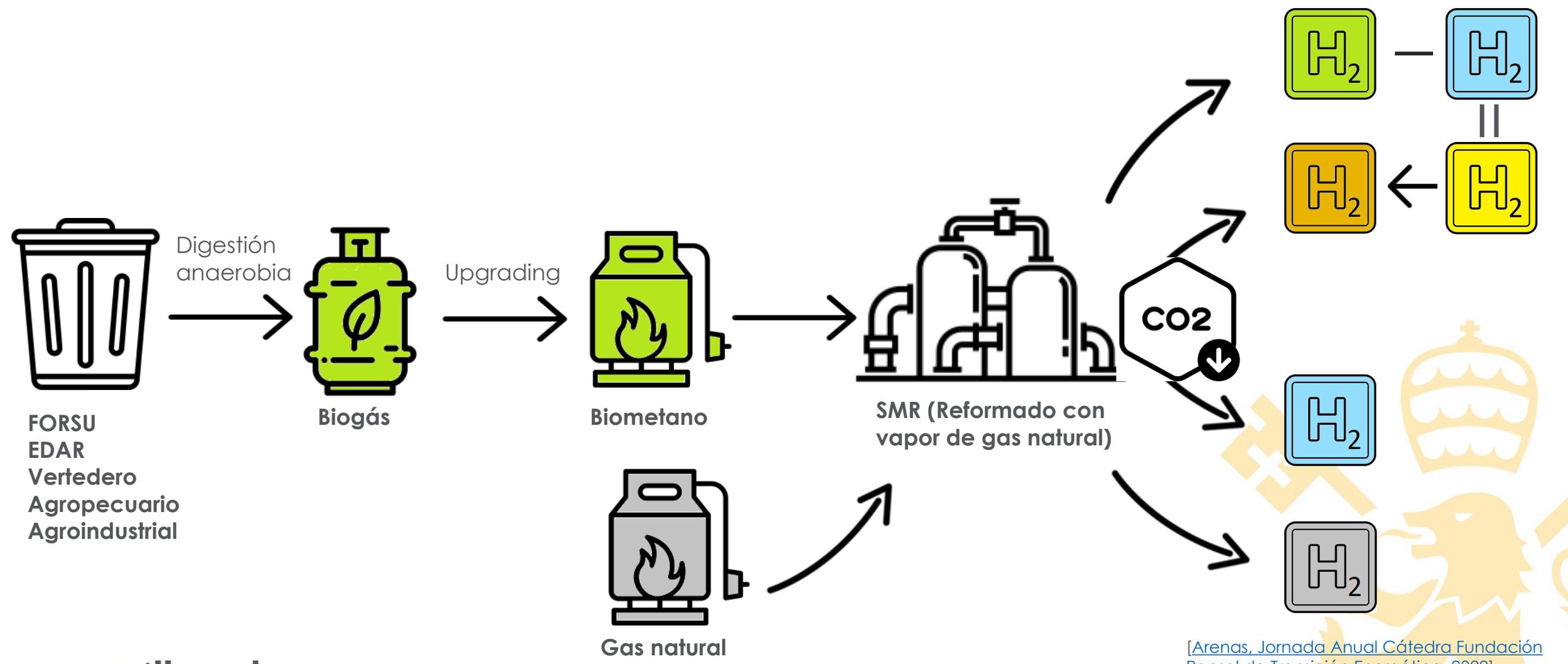
EMISIONES de CO2 NEGATIVAS: BECCS



Plantas como DACs naturales

Hidrógeno DORADO

¿Qué es?



Hidrógeno DORADO Precedentes

[HARENSES, 2022]

Repsol produce hidrógeno a partir de biometano en una refinería española

UPSTREAM ONLINE / 05 OCTUBRE 2021



El hidrógeno se utilizará en la producción de combustibles como gasolina, gasóleo o queroseno para la aviación.

[Upstream Online, 5/10/2021]

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



- En Haro se va a producir hidrógeno por reformado de biogás

The screenshot shows the BIOGAS CHANNEL website interface. At the top, there is a navigation menu with links for 'About us', 'News and Events', 'Upload Video', 'Speakers', 'Newsletter', 'Contacts', and 'Advanced Search'. Below the menu is a search bar with the placeholder text 'Search for topics, videos and speakers'. The main content area features a video player with a man in a suit speaking. The BIOGAS CHANNEL logo is visible in the bottom right corner of the video player, along with social media sharing icons for Facebook, Twitter, and LinkedIn.



Hidrógeno desde biometano

Potencial

Electrolizadores
equivalentes***

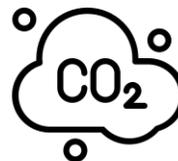


Proyectos
Biometano
2022

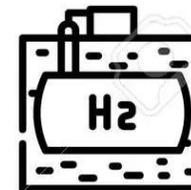
2 TWh



41.200 ton
7% demanda*



357,2 kton
compensadas



412 MW

Hoja de
Ruta Biogás
2030

10 TWh

200.000 ton
30% demanda*

1,8 Mton
compensadas

2 GW
(Hoja de Ruta
del Hidrógeno, 4
GW en 2030)

FORSU anual
en España**

180.404 ton
30% demanda*

1,56 Mton
compensadas
(0,5% España en 2019)

1,8 GW
45% de los
previstos en 2030

*Demanda actual de Hidrógeno en España (uso industrial): 600.000 ton/año

**3,81 kg H₂/pax-año, 47,35 Mpax

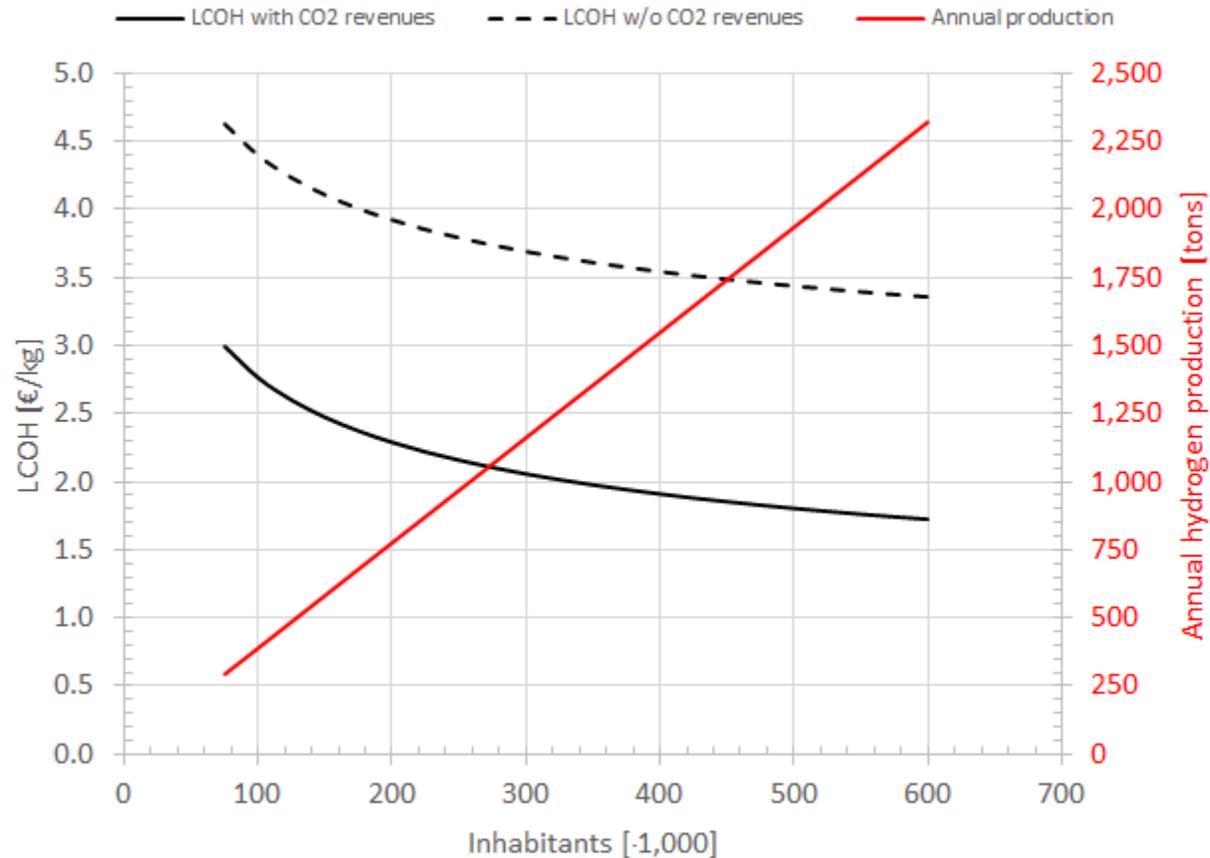
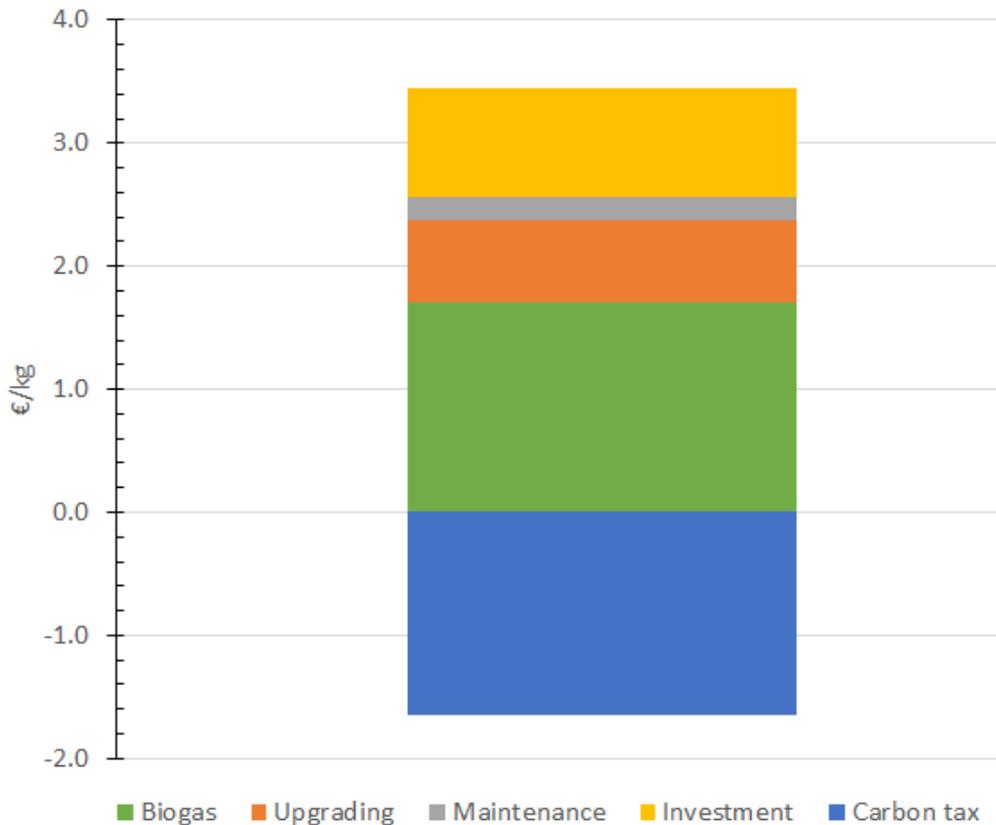
***Hidrógeno verde en valor neto (100 ton H₂/año por cada 1 MW)

Hidrógeno dorado de FORSU

Costes

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

500.000 habitantes



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

Hidrógeno dorado de FORSU

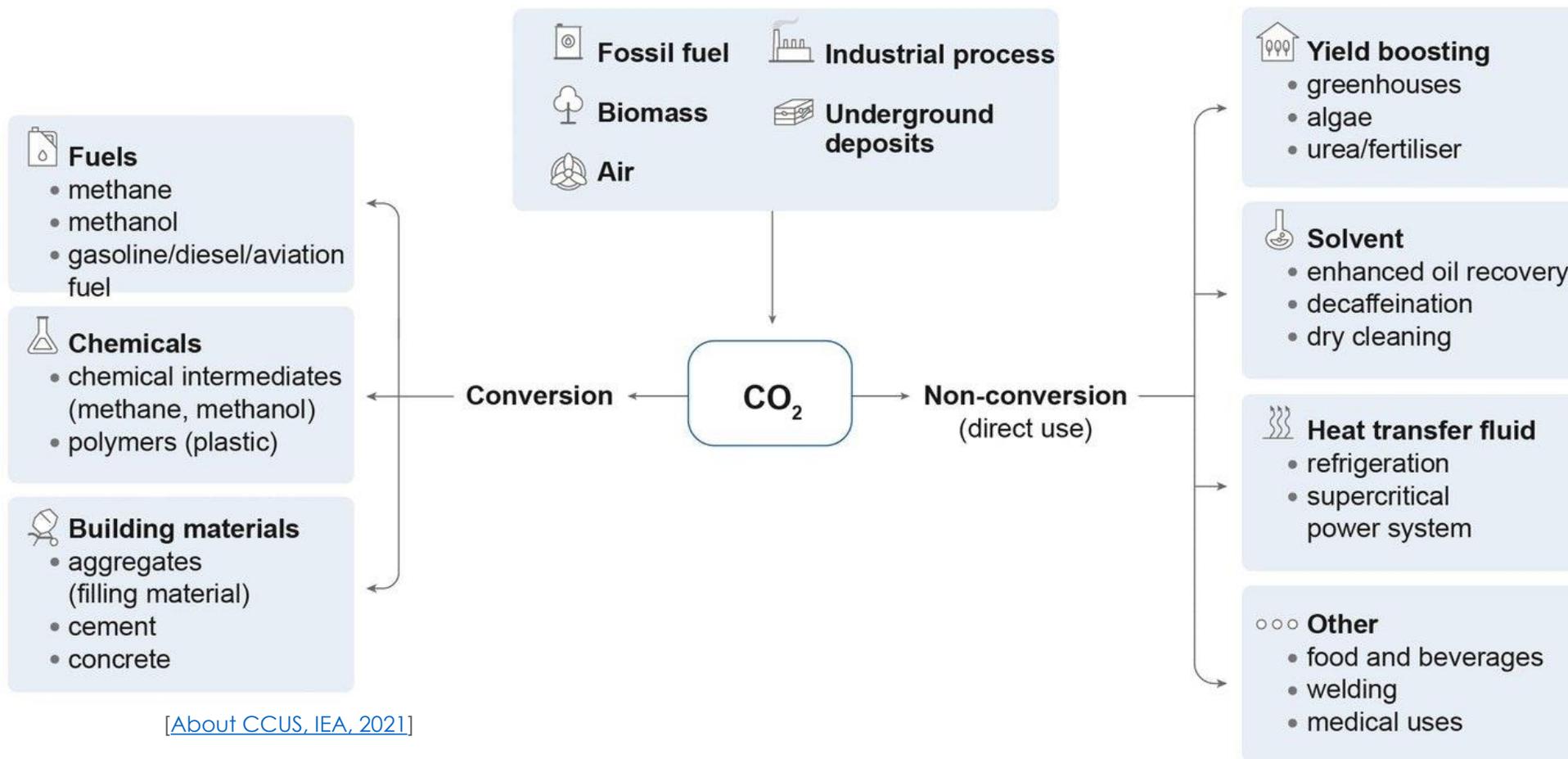
Almacenamiento de CO₂ (CCS)

- 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 en el peor de los casos para 320 años

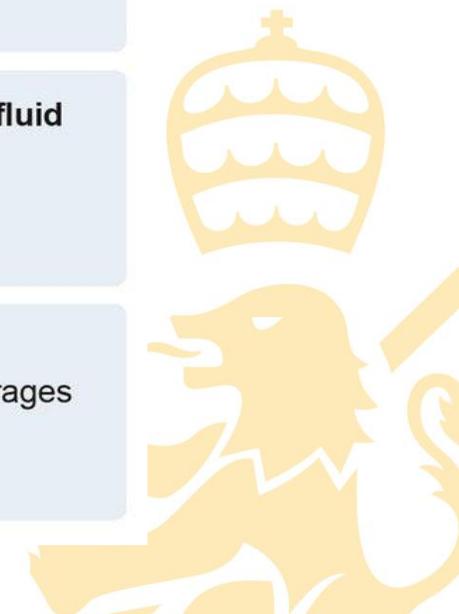


Hidrógeno dorado de FORSU

Uso de CO₂ (CCUS)

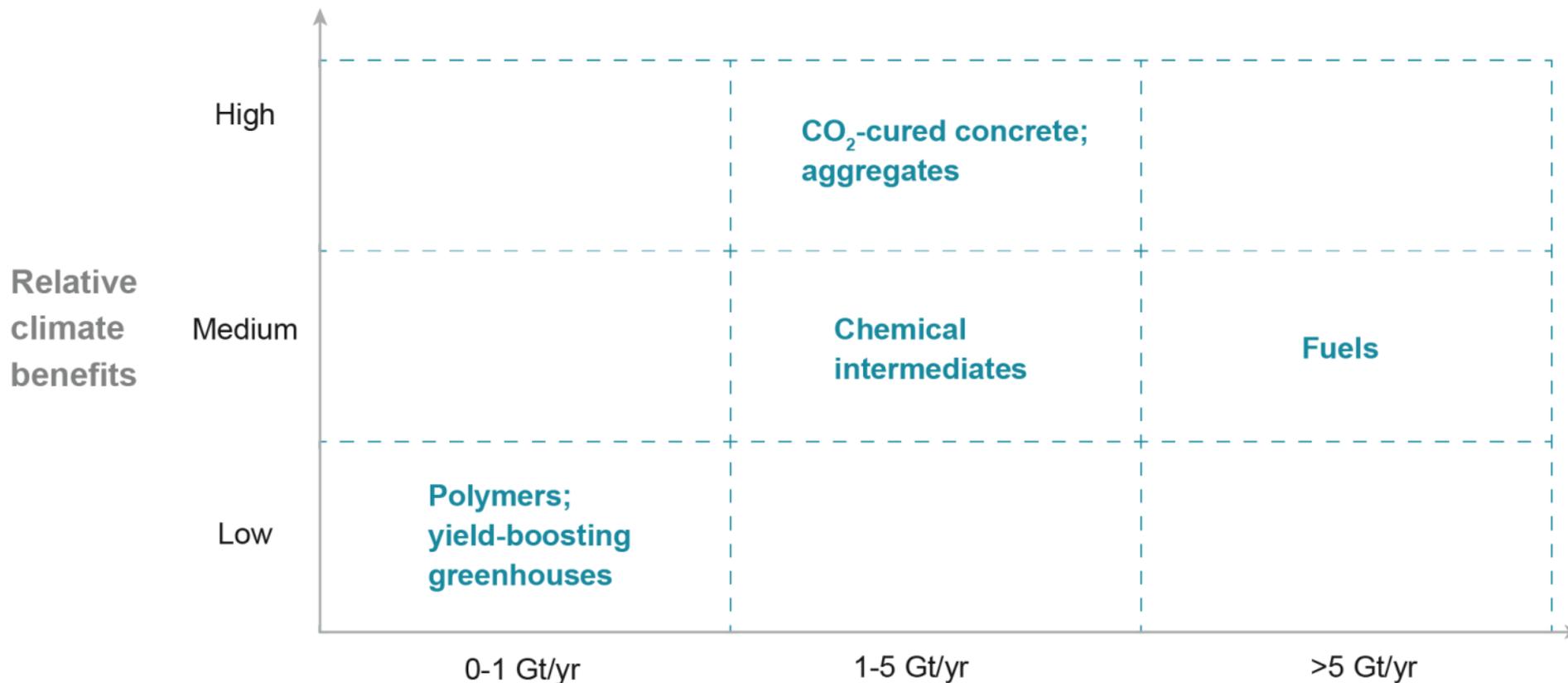


[About CCUS, IEA, 2021]



Hidrógeno dorado de FORSU

Uso de CO₂ (CCUS)



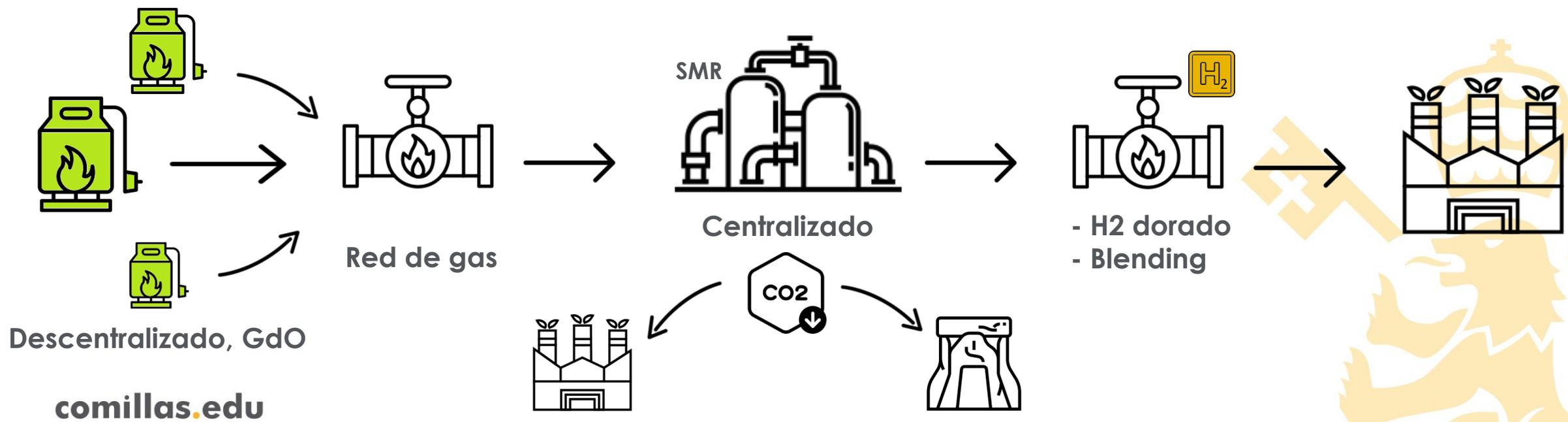
[Putting CO₂ to Use. Creating value from emissions, IEA, September 2019]



Hidrógeno dorado

Regulación y planificación

- Reforma del sistema ETS para **permitir la venta de derechos de CO₂** del productor al consumidor
- Producción **centralizada** de hidrógeno usando los **certificados de garantía de origen de biometano**
- Favorece la **escala de la planta de producción de H₂** y su ubicación junto a consumo/sumidero de CO₂, aprovechando la **red de gas como transporte del biometano**
- Se requeriría concentrar **pequeños productores** para controlar **costes upgrading** (no crítico en RSU)



Hidrógeno dorado

Costes. Comparativa con electrólisis

Figure: H₂-production costs in different accounting periods for existing and new plants (example: combination of PV/wind)



Source: Frontier Economics

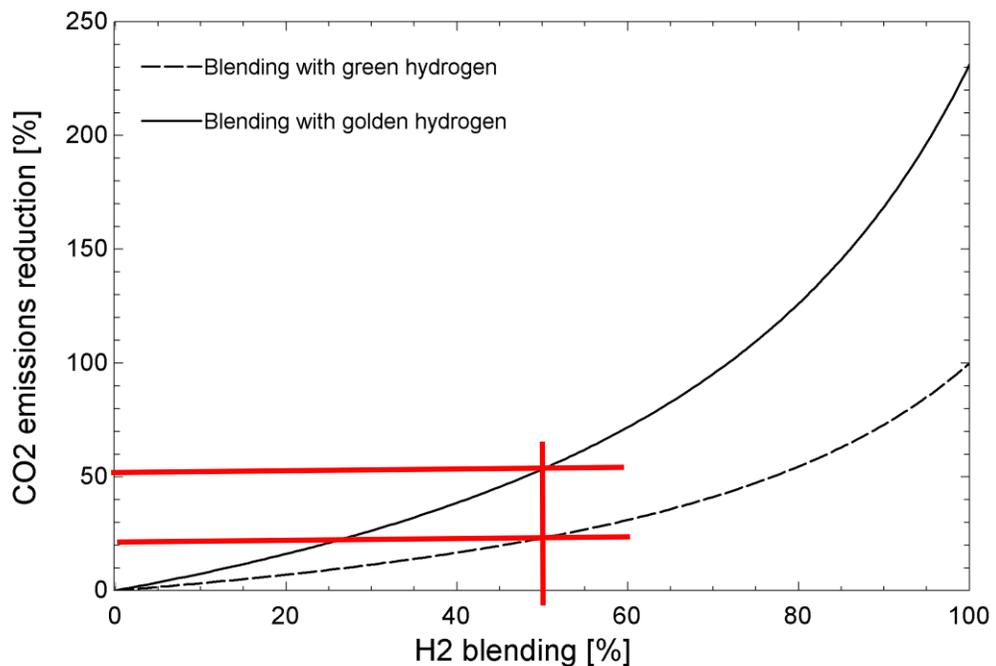
Note: Calculations based on electricity prices and profiles in 2019.

[RWE AG, frontier economics, 2021]

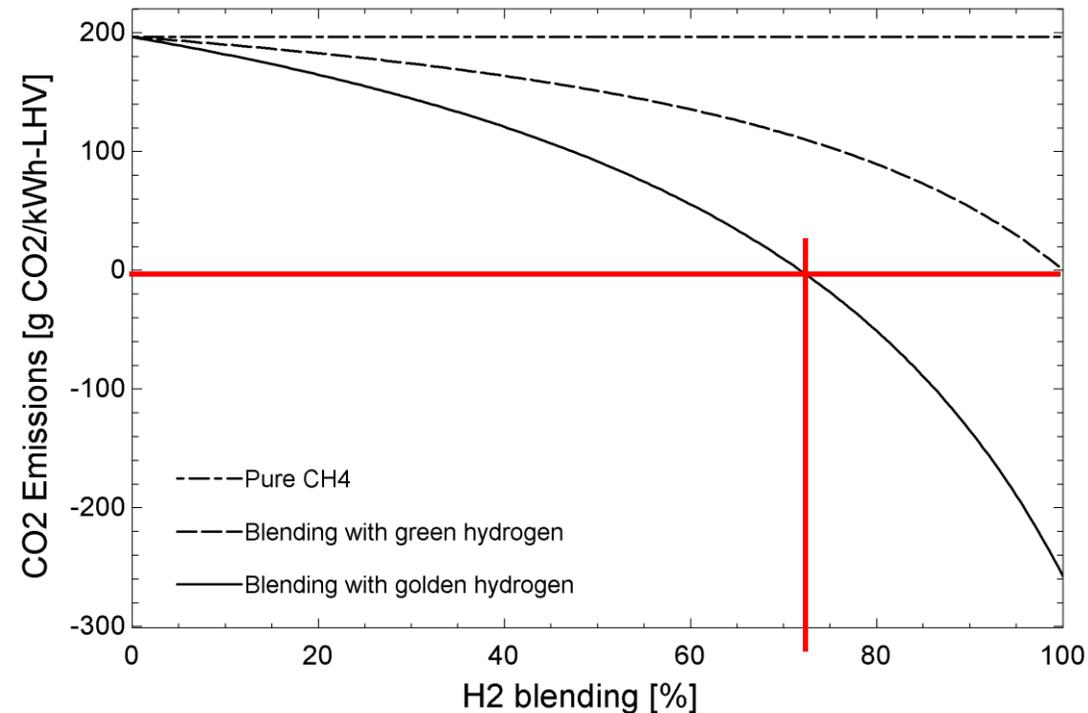
- Los costes del hidrógeno verde electrolítico **dependen de los criterios** que se establezcan para la definición de verde:
 - ✓ Correlación temporal trimestral*
 - ✓ No adicionalidad*
- En cualquier caso, estas restricciones **no afectan al precio del H₂ obtenido en un SMR por biometano.**

Hidrógeno dorado

Industrias termointensivas: 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*

Hidrógeno dorado

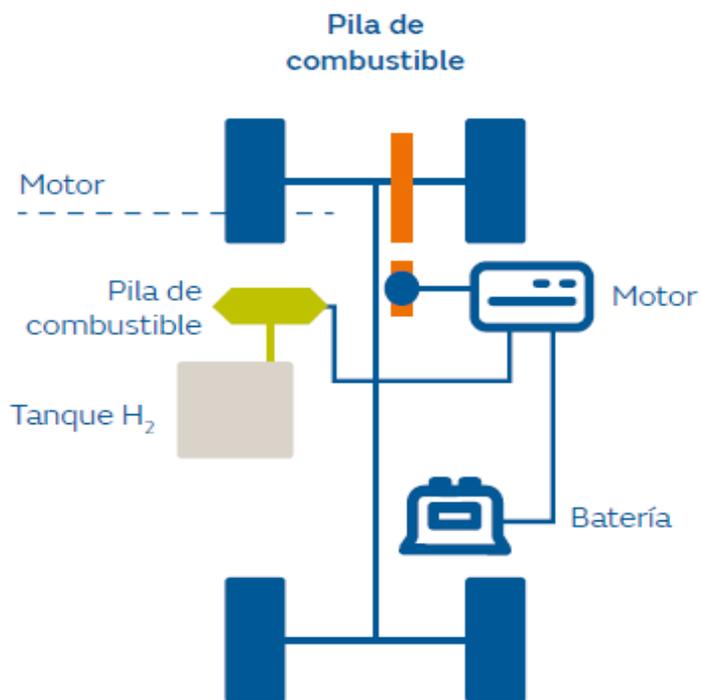
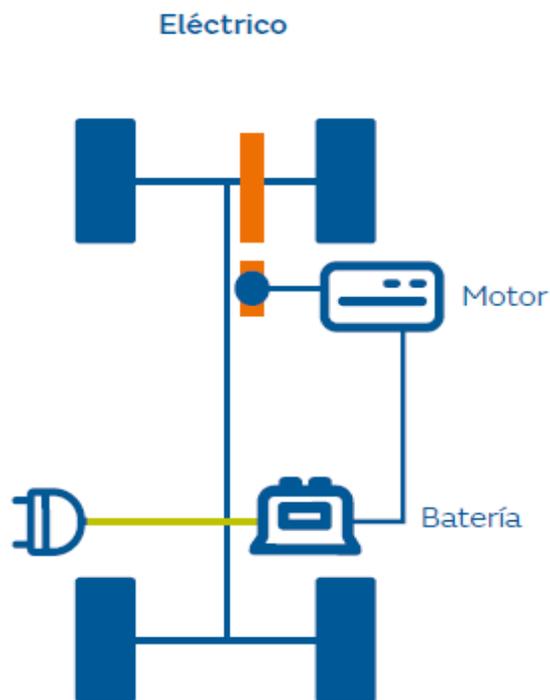
Ventajas sobre el biometano

- Producción de hidrógeno adicional a la generación eléctrica.
- Coste (sin captura) comparable con el electrolítico. Incluyendo derechos de emisión negativos se logra coste similar al azul actual.
- Compensación de emisiones inevitables de forma centralizada:
 - Uso de restos orgánicos como **captadores de CO2 del ambiente (DAC)**
 - La captura de CO2 del SMR constituye una tecnología de captura **pre-combustión**
- Mayor valor añadido (materia prima en muchas industrias).
- Revalorización del CO2 capturado
 - Si el CO2 termina de nuevo en el ambiente tendríamos hidrógeno verde
 - Si el CO2 queda retenido en materiales o en el subsuelo tendríamos hidrógeno dorado. Especialmente interesante la **mineralización artificial**



Hidrógeno dorado

Vehículos con pila de combustible



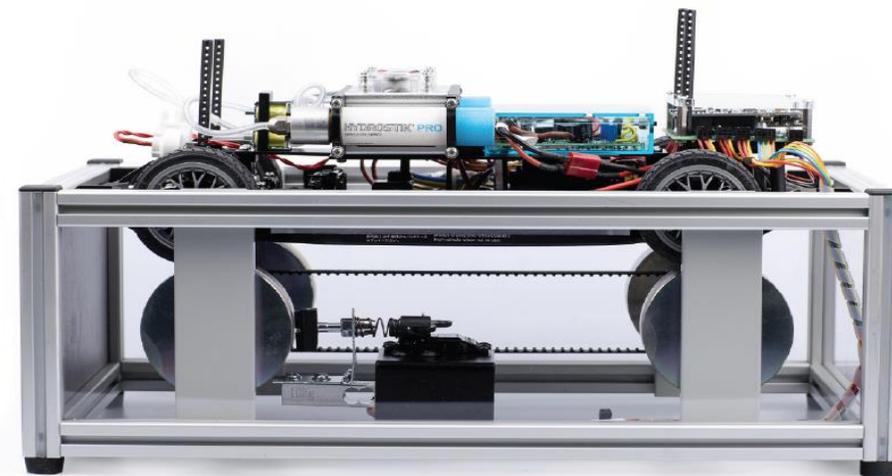
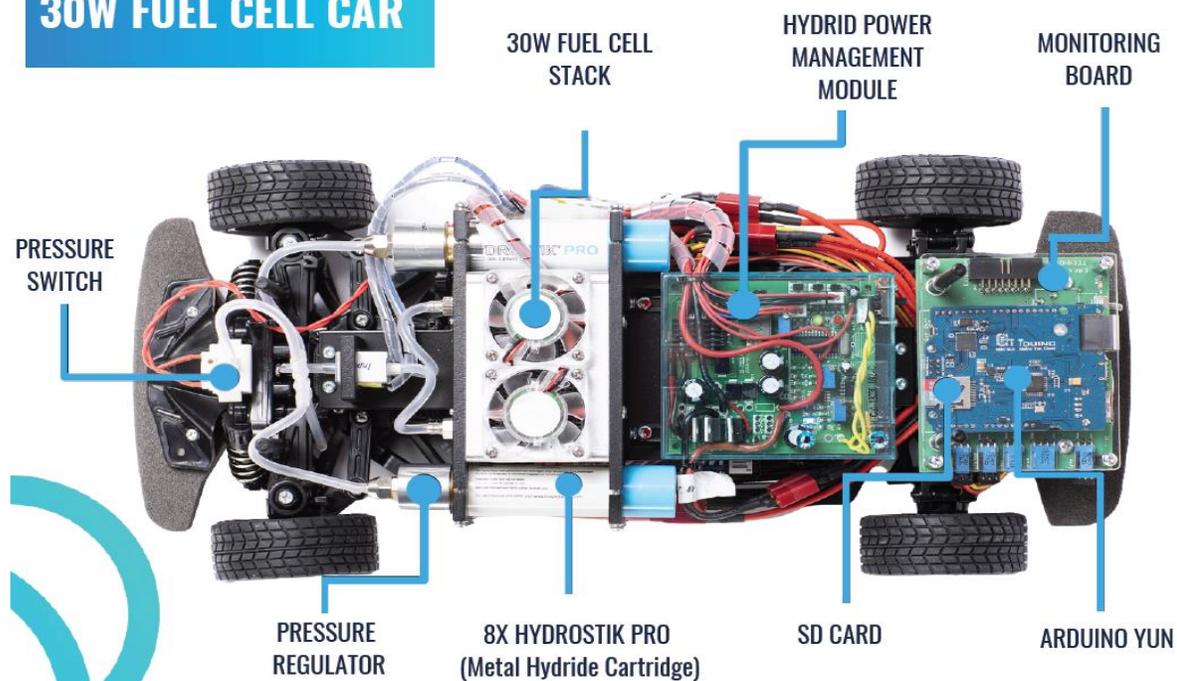
[NATURGY, 2019]

- Hay dos tipos de vehículos eléctricos:
 - BEV
 - FCEV
- El FCEV es un vehículo híbrido autorrecargable
- La batería se recarga con el frenado y con los excedentes de la FC para evitar trabajo intermitente

Hidrógeno dorado

Vehículos con pila de combustible

30W FUEL CELL CAR



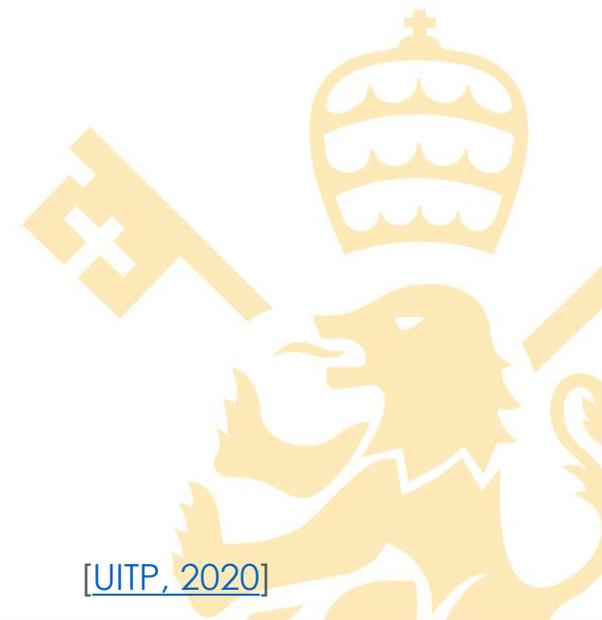
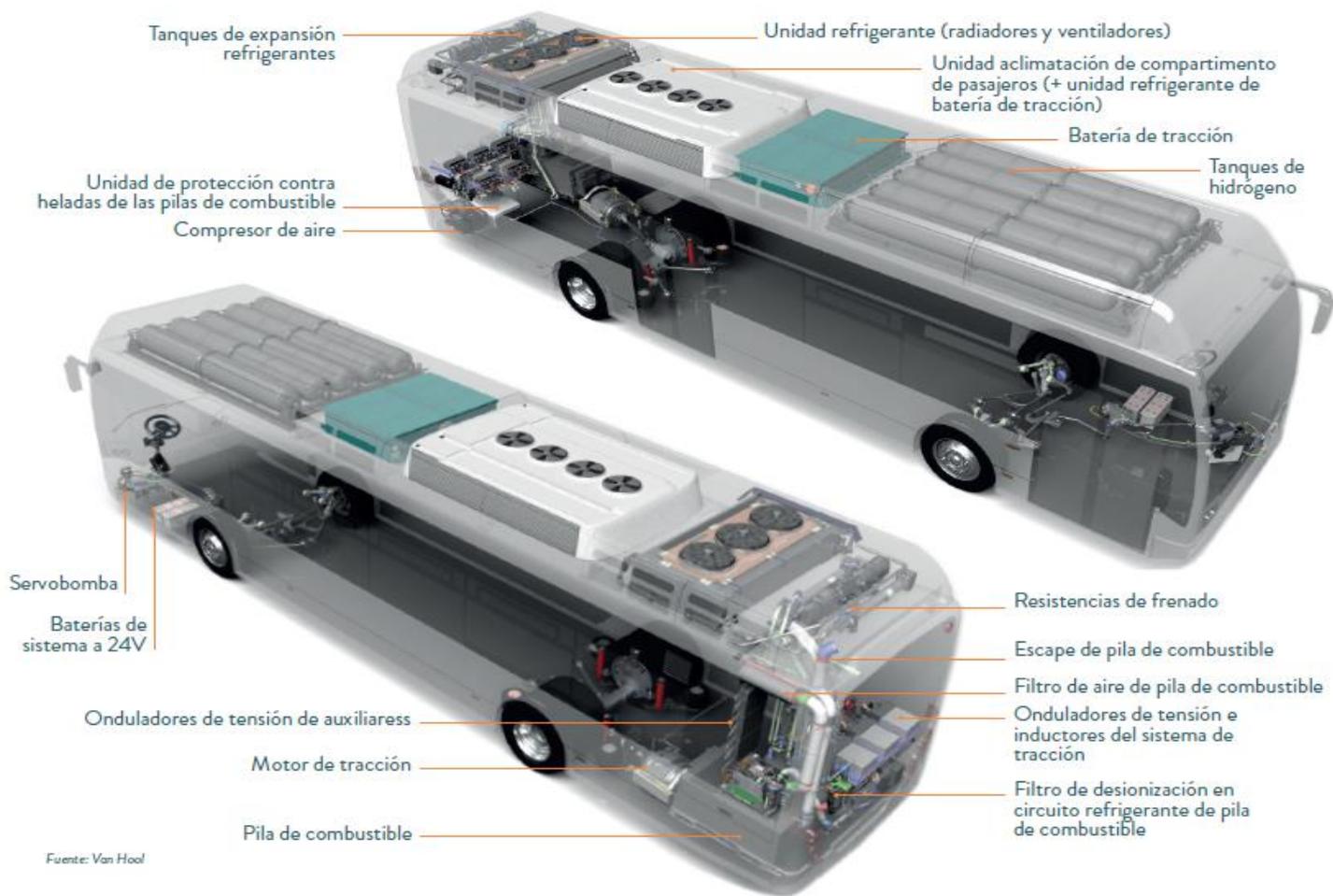
Vehículo montado sobre banco de rodillos

- Vehículo híbrido (batería en la parte inferior)
- *Hybrid power management module* gestiona la carga de la batería desde la FC



Hidrógeno dorado

Autobuses urbanos con pila de combustible



Hidrógeno dorado

Autobuses urbanos con pila de combustible

Sitios de despliegue en JIVE y JIVE 2, a partir de julio de 2020.



CIUDAD/REGION	Número de autobuses
Aberdeen, Reino Unido	21
Auxerre, Francia	5
Barcelona, España	8
Birmingham, Reino Unido	20
Brighton, Reino Unido	22
Charleroi, Bélgica	10
Colonia, Alemania	50
Dundee, Reino Unido	12
Emmen, Países Bajos	10
Güeldres, Países Bajos	10
Groningen, Países Bajos	20
Londres, Reino Unido	20
Pau, Francia	5
Rhein Main, Alemania	10
Holanda Meridional, Países Bajos	20
Tirol del Sur, Italia	12
Toulouse, Francia	5
Velenje, Eslovenia	6
Wuppertal, Alemania	20

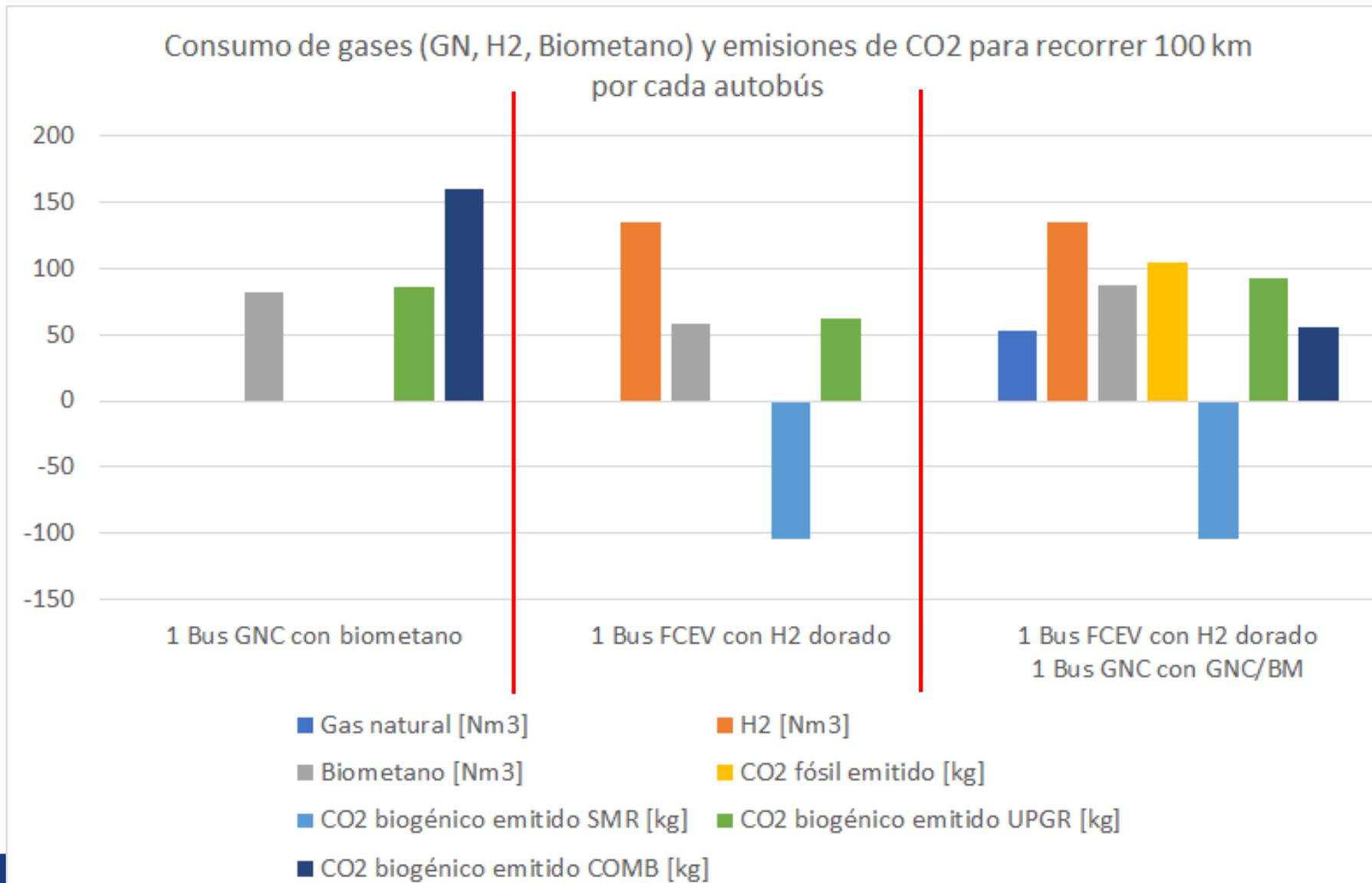
[UITP, 2020]

* Cuatro autobuses permanecen bajo revisión



Hidrógeno dorado

Aplicación al transporte



Hidrógeno dorado

Aplicación al transporte

- Un autobús de gas natural recorre 100 km alimentado con biometano. Emisiones neutras de CO2.

[el Periódico, 2022]

el Periódico

ARAGÓN | LA CRÓNICA DE VALDEJALÓN | COMARCAS | CAMPO DE CARIÑENA | CAMPO DE BORJA | RIBERA ALTA DEL EBRO | EJE Y SUS PUEBLOS | CAMPO DE BELCHITE | LA HOYA DE HUESCA

ENCUENTRO DE LA RED DE CIUDADES INNOVADORAS

La Almunia presenta a la Red Innpulso el proyecto de Biogasdt

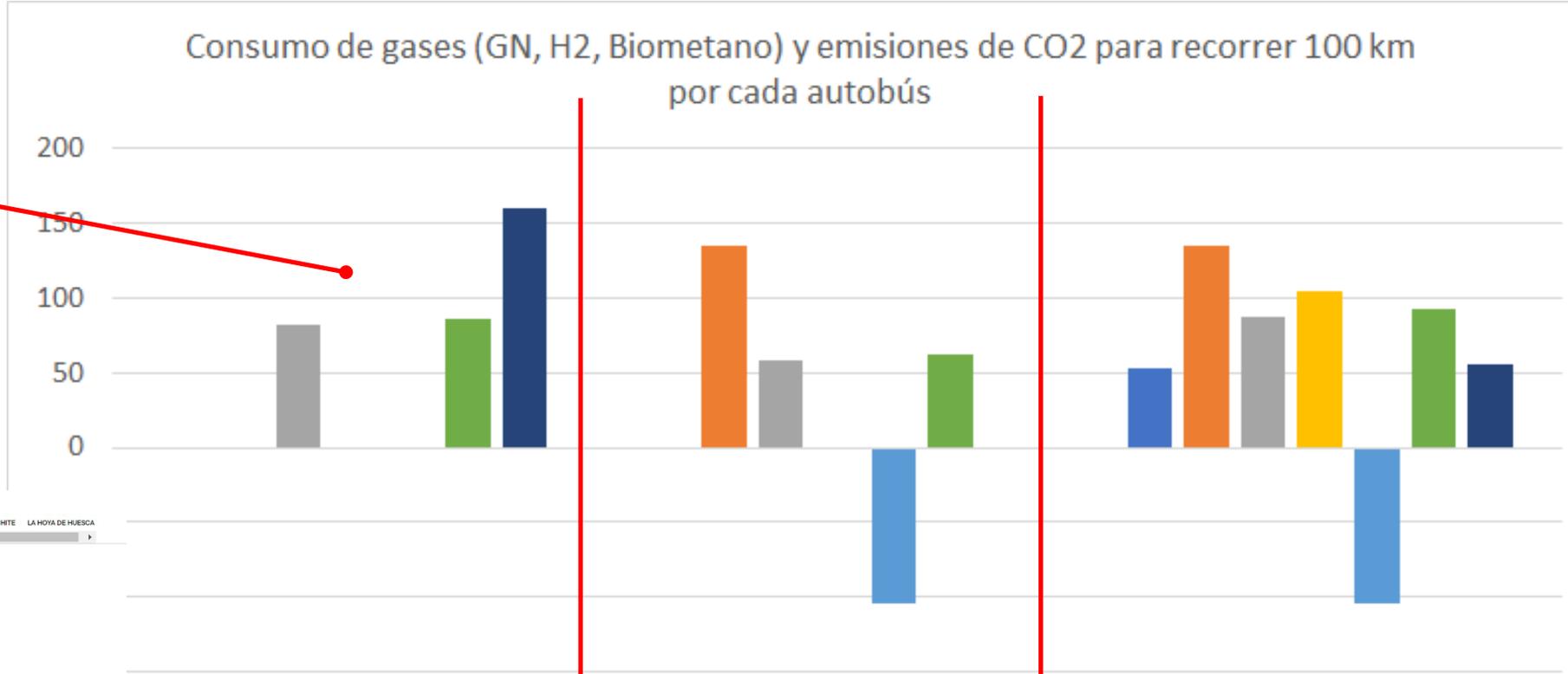
Con esta iniciativa se transformarán los excrementos de gallinas en combustible ecológico



LA CRÓNICA
 27-10-22 | 21:41 | Actualizado a las 09:28



La Almunia presenta a la Red Innpulso el proyecto de Biogasdt



1 Bus GNC con biometano

1 Bus FCEV con H2 dorado

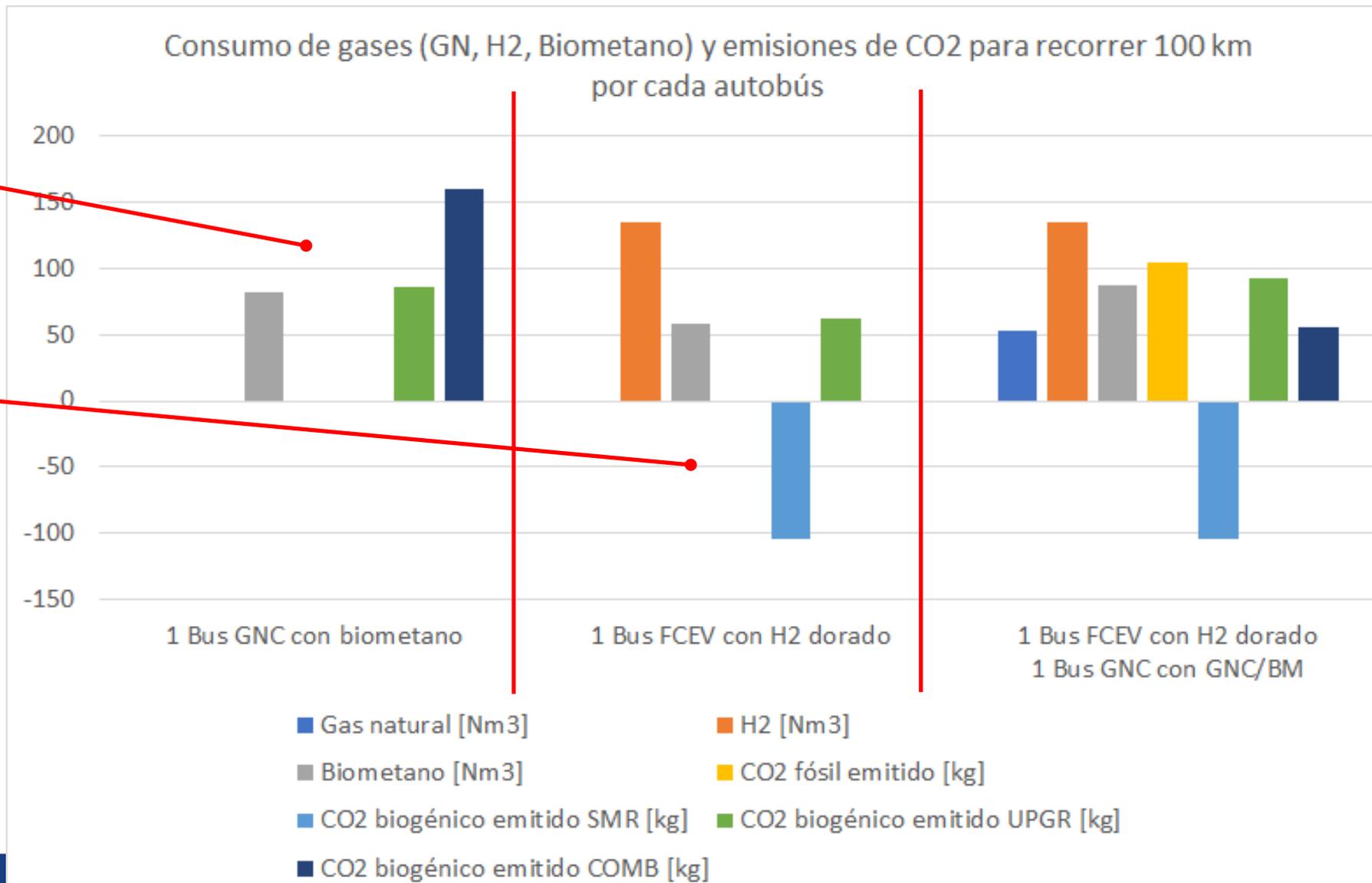
1 Bus FCEV con H2 dorado
 1 Bus GNC con GNC/BM

- Gas natural [Nm3]
- H2 [Nm3]
- Biometano [Nm3]
- CO2 fósil emitido [kg]
- CO2 biogénico emitido SMR [kg]
- CO2 biogénico emitido UPGR [kg]
- CO2 biogénico emitido COMB [kg]

Hidrógeno dorado

Aplicación al transporte

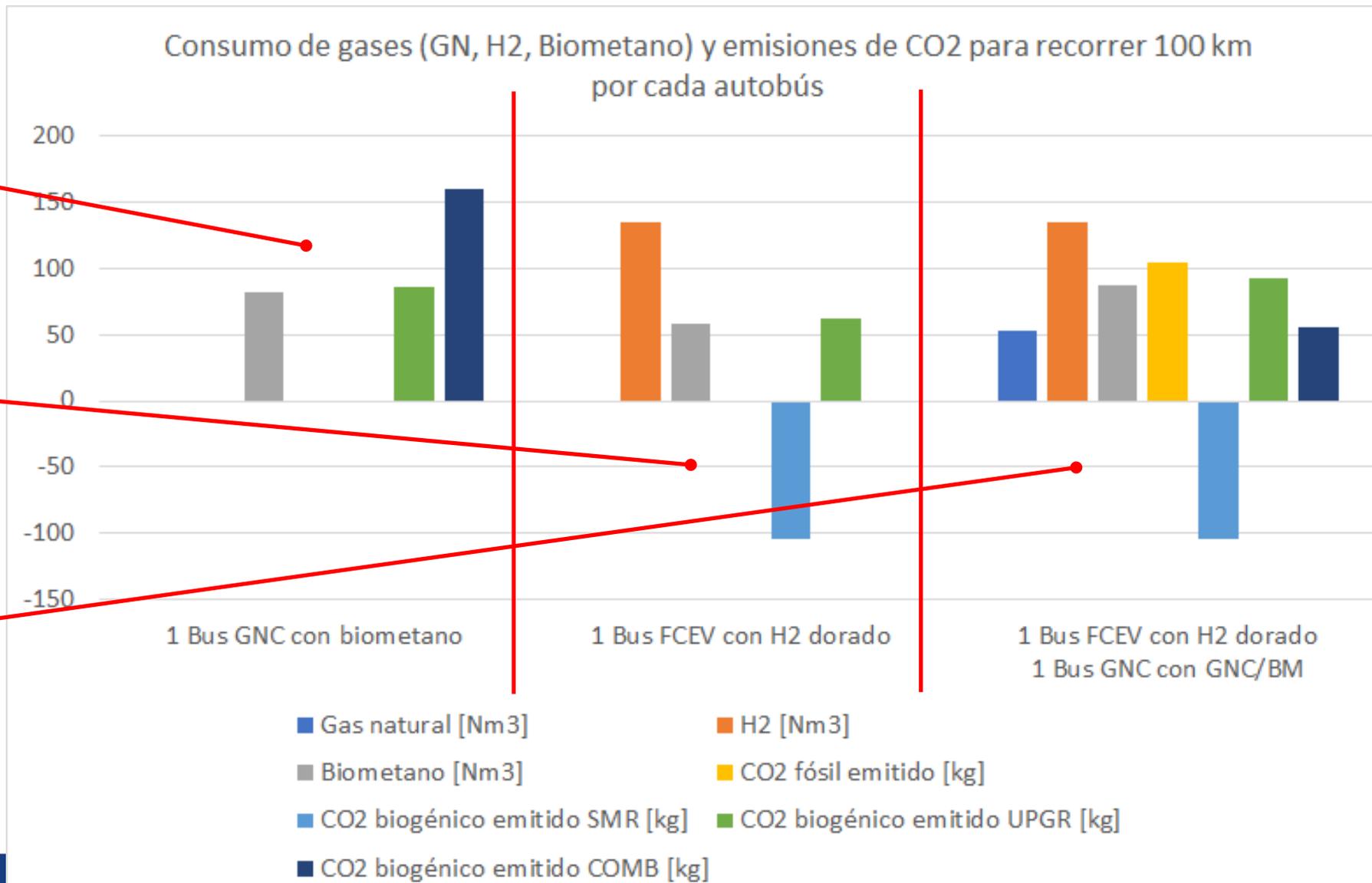
- Un autobús de gas natural recorre 100 km alimentado con biometano. Emisiones neutras de CO2.
- Un autobús de pila de combustible recorre 100 km alimentado con Hidrógeno dorado. Emisiones negativas de CO2.



Hidrógeno dorado

Aplicación al transporte

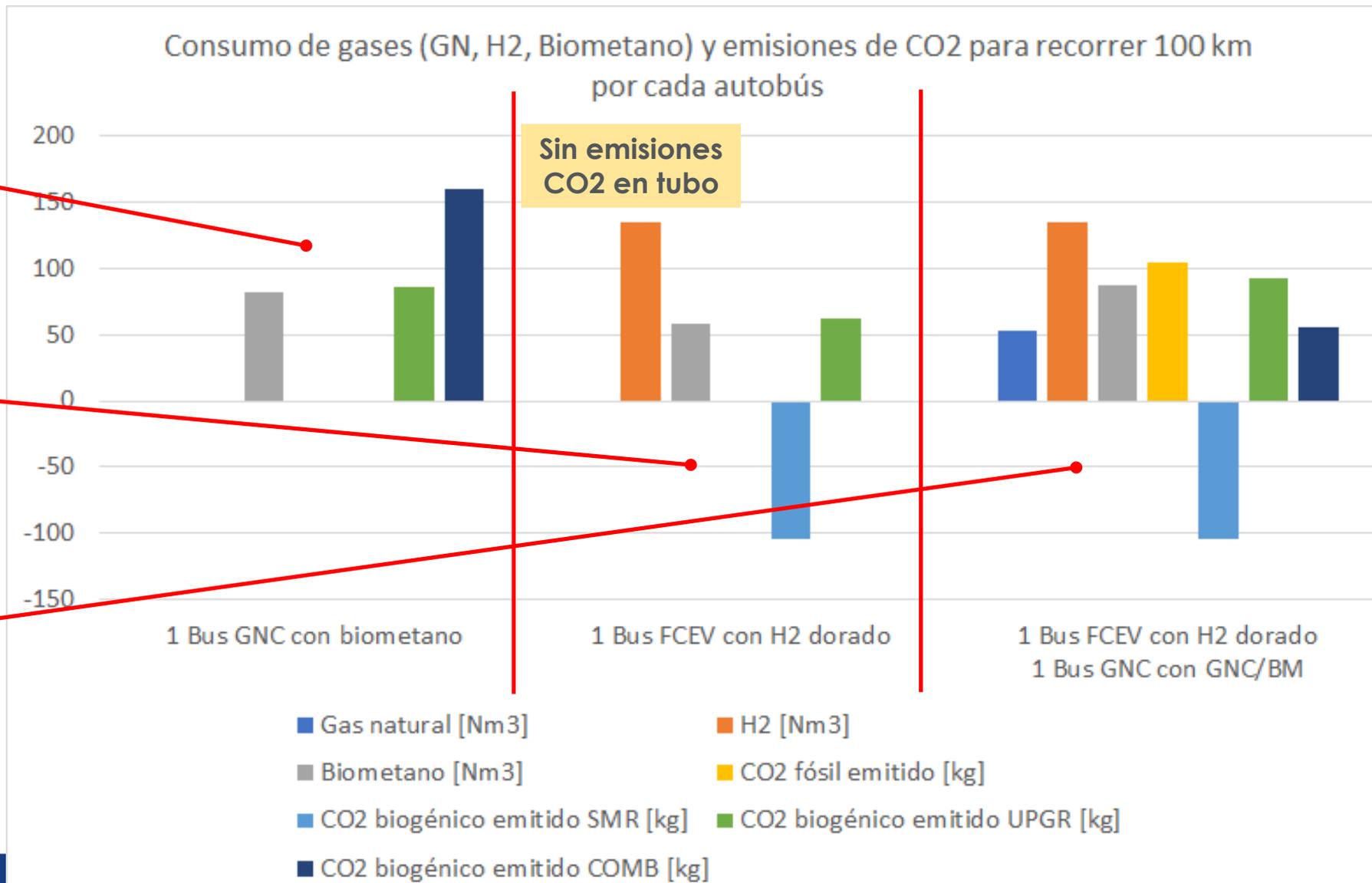
- Un autobús de gas natural recorre 100 km alimentado con biometano. Emisiones neutras de CO2.
- Un autobús de pila de combustible recorre 100 km alimentado con Hidrógeno dorado. Emisiones negativas de CO2.
- Un autobús de pila de combustible recorre 100 km y otro de gas natural recorre otros 100 km alimentado con gas natural y biometano (65% gas natural). Emisiones neutras de CO2.



Hidrógeno dorado

Aplicación al transporte

- Un autobús de gas natural recorre 100 km alimentado con biometano. Emisiones neutras de CO2.
- Un autobús de pila de combustible recorre 100 km alimentado con Hidrógeno dorado. Emisiones negativas de CO2.
- Un autobús de pila de combustible recorre 100 km y otro de gas natural recorre otros 100 km alimentado con gas natural y biometano (65% gas natural). Emisiones neutras de CO2.

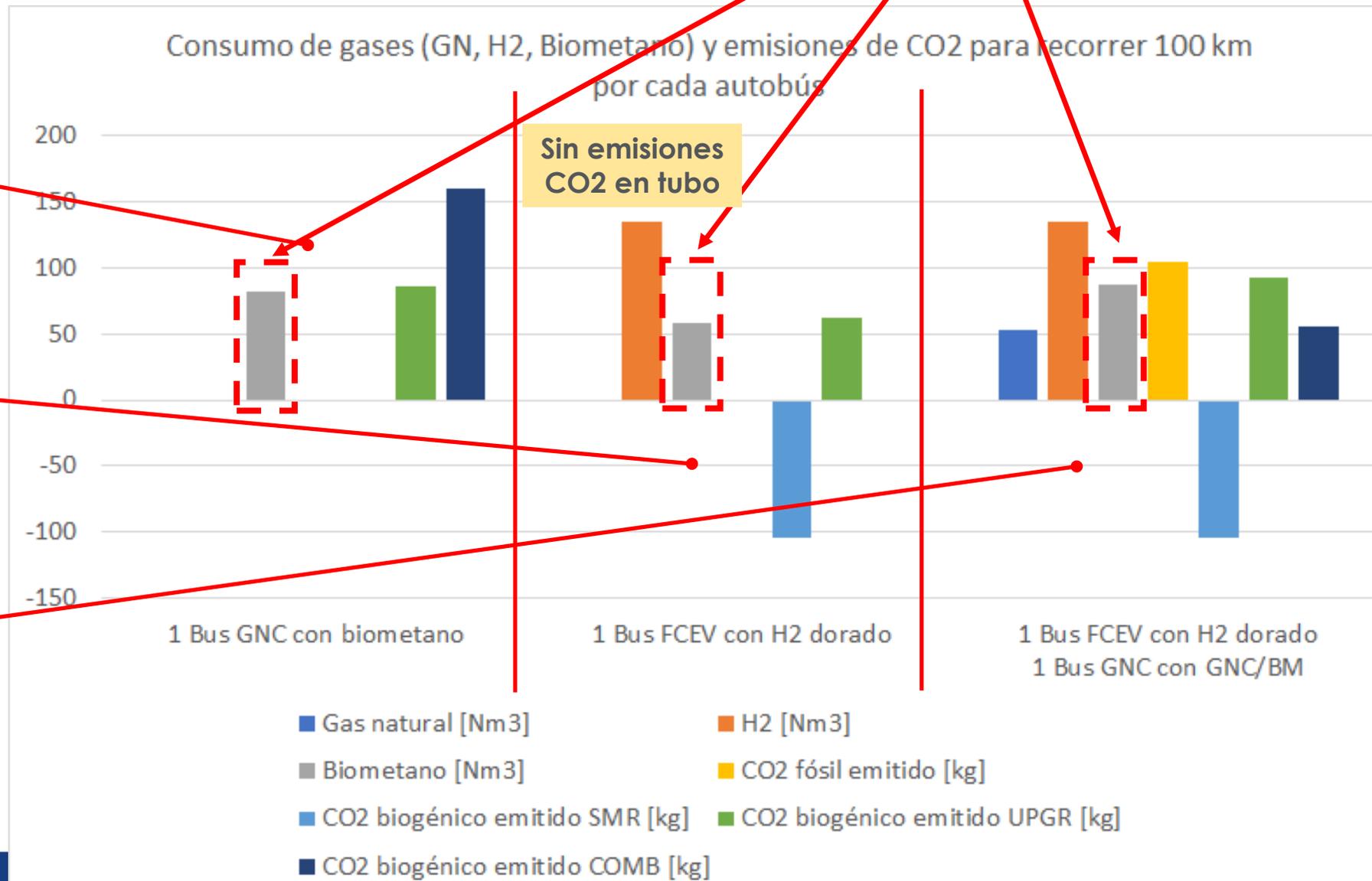


Hidrógeno dorado

Aplicación al transporte

El hidrógeno dorado optimiza el uso del biometano

- Un autobús de gas natural recorre 100 km alimentado con biometano. Emisiones neutras de CO2.
- Un autobús de pila de combustible recorre 100 km alimentado con Hidrógeno dorado. Emisiones negativas de CO2.
- Un autobús de pila de combustible recorre 100 km y otro de gas natural recorre otros 100 km alimentado con gas natural y biometano (65% gas natural). Emisiones neutras de CO2.



Hidrógeno dorado

Autobuses urbanos con FC en Madrid



G.D. 02/07

Autobús 9051, modelo Mercedes Benz O530 BZ (Citar Cell). Funcionó en Madrid en **2003** dentro del [Proyecto CUTE/ECTOS](#)

[[AEMTBUS](#)]



Hidrógeno dorado

Autobuses urbanos con FC en Madrid



- En la actualidad se está construyendo una hidrogenera con FV en Entrevías
- Alimentará a 10 autobuses con FC
- Integrado en el Plan Estratégico de la EMT hasta 2025
- En diciembre de 2022 se reitirarán todos los autobuses diesel y solo quedarán eléctricos (BEV) y de GNC

Hidrógeno dorado

Autobuses urbanos con FC en Madrid

¿y si se usase *hidrógeno dorado*?

- **Parque existente**
 - 212 líneas
 - 2.049 vehículos
 - 100.475.522 km/año
- **Recurso**
 - 3.334.730 habitantes
 - 12.705 ton H₂/año
- **Autobús con pila de combustible**
 - $10 \div 14 \text{ kg H}_2/100 \text{ km} \Rightarrow 12 \text{ kg H}_2 /100 \text{ km}$
 - 12.057 ton H₂/año
- **Emisiones de CO₂**
 - 110.155 ton CO₂/año (capturadas en el SMR)
 - Por 1 km recorrido por el bus se retiran del ambiente 1.040 g CO₂
 - 1 km de bus
 - Evita 2 kg de CO₂ (bus con GNC)
 - Compensa 1 km de 10 coches de combustión modernos (95 g CO₂/km)

Hidrógeno dorado

Autobuses urbanos en Madrid

¿y si se usase *hidrógeno dorado*?

- **Costes**

- 25 €/MWh GNV = 125 €/MWh en rueda (mayorista)
- 2 €/kg GNC = 720 €/MWh en rueda (gasolinera octubre 2022)
- 1 €/kg GNC = 360 €/MWh en rueda (gasolinera enero 2022)

- 3,5 €/kg H₂ (sin crédito CO₂) = 208 €/MWh en rueda
- 1,8 €/kg H₂ (con crédito CO₂) = 107 €/MWh en rueda
- 9 €/kg H₂ (actual en Alemania) = 536 €/MWh en rueda

- Usando gas el precio minorista es x3 el mayorista

- Podríamos esperar un precio minorista del Hidrógeno dorado entre 300 y 600 €/MWh en rueda, según se usen los créditos de CO₂.

Hidrógeno dorado

Hidrógeno desde biogás en Haro

- El Proyecto [H2ARO](#) se ha presentado a la convocatoria **Misiones de Ciencia e Innovación**
- Aprovechamiento de residuo orgánico urbano y del sector agroalimentario para convertirlo en hidrógeno renovable
- Se realiza el reformado avanzado (A-SMR) mediante un reactor catalítico de membranas en lecho fluidizado que permite concentrar las etapas tradicionales del SMR en una sola [\[TECNALIA\]](#).
- Aplicación: vehículos de recogida de RSU
- Sacyr, H2SITE, ARIEMA, ORCHESTRA, EVARM, NEWALME, UNIR, TECNALIA, Ayuntamiento de Haro



CONCLUSIONES

- El uso de los residuos es **YA una oportunidad** para producir **hidrógeno renovable** a un precio competitivo
- Puede **complementar la producción electrolítica** de hidrógeno renovable, **liberando uso** de la red eléctrica
- La captura de CO₂ que habilita la tecnología SMR de biometano permite **compensar emisiones de CO₂ inevitables**, lo que no logra la electrólisis renovable
- Es importante desarrollar **usos** alternativos del CO₂, que preferiblemente lo retengan
 - Mineralización natural (almacenamiento geológico)
 - Mineralización artificial (producción carbonatos “verdes” para áridos, cemento, rellenos...)
 - Fabricación de polímeros



CONCLUSIONES

- Aplicación al **sector transporte**:
 - Mejor uso del biometano que con motor de combustión
 - Los autobuses urbanos (flotas) presentan ventaja de concentración para el punto de recarga
 - Los RSU generan recurso suficiente para la demanda del transporte público
 - Los autobuses de FC son ya considerados por los ayuntamientos, con hidrógeno verde
 - El empleo del hidrógeno dorado evita las emisiones del autobús y compensa la de vehículos de combustión, o de otro autobús GN/BM
 - Otros campos: metro ligero/ferrocarril de cercanías

REFERENCIAS

- [E. Arenas, Hidrógeno dorado o cómo alcanzar emisiones negativas de CO2 a partir de residuos orgánicos, Jornada Anual de la Cátedra Fundación Repsol de Transición Energética en Comillas-ICAI, 27.09.2022](#)
- [L. Martí, Generando productos de valor a partir del CO2, II Jornada de la Cátedra Fundación Repsol de Transición Energética en Comillas-ICAI: Descarbonización de la industria para un futuro con bajas emisiones de carbono](#)
- [L. Lefranc, Viabilidad del hidrógeno renovable procedente de residuos para cubrir la demanda urbana de climatización y movilidad en la España peninsular, TFM en Comillas-ICAI, 2022](#)
- [Soler, V.E., Linares, J.I., Arenas, E., Romero, J.C., Hydrogen from municipal solid waste as a tool to compensate unavoidable GHG emissions, III International Conference on Engineering Thermodynamics, Madrid June 29 to July 1, 2022](#)



**CÁTEDRA
DE TRANSICIÓN
ENERGÉTICA**



**CÁTEDRA
RAFAEL MARIÑO
DE NUEVAS TECNOLOGÍAS
ENERGÉTICAS**



Gracias por su atención

linares@comillas.edu
earenas@comillas.edu

comillas.edu



**CÁTEDRA
DE TRANSICIÓN
ENERGÉTICA**



**CÁTEDRA
RAFAEL MARIÑO
DE NUEVAS TECNOLOGÍAS
ENERGÉTICAS**

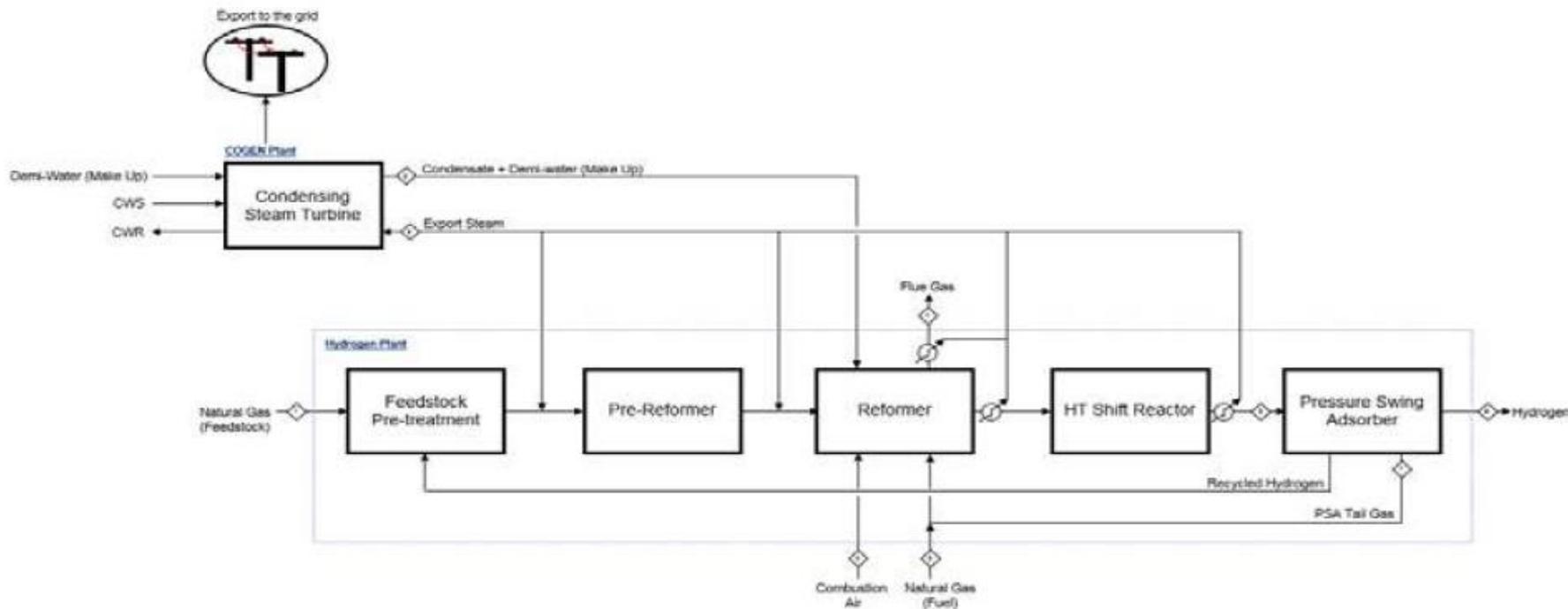


Anexo

Cálculos justificativos



Hidrógeno VERDE de biometano. Producción



[IEA, 2017]

Figure 1: Base Case - SMR plant without CO₂ capture producing 100,000 Nm³/h H₂.

- Producción H₂ por SMR: 2,51 kmol H₂/kmol CH₄ (75,9% de eficiencia)
- Producción de CO₂: ≈ 8,8 kg CO₂/kg H₂



Hidrógeno VERDE de FORSU

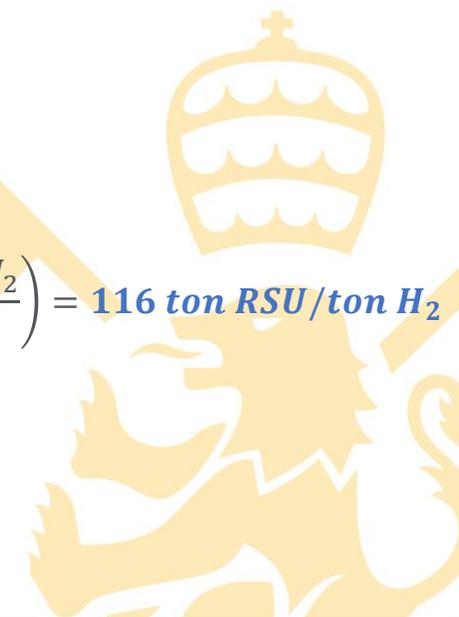
Producción

- 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

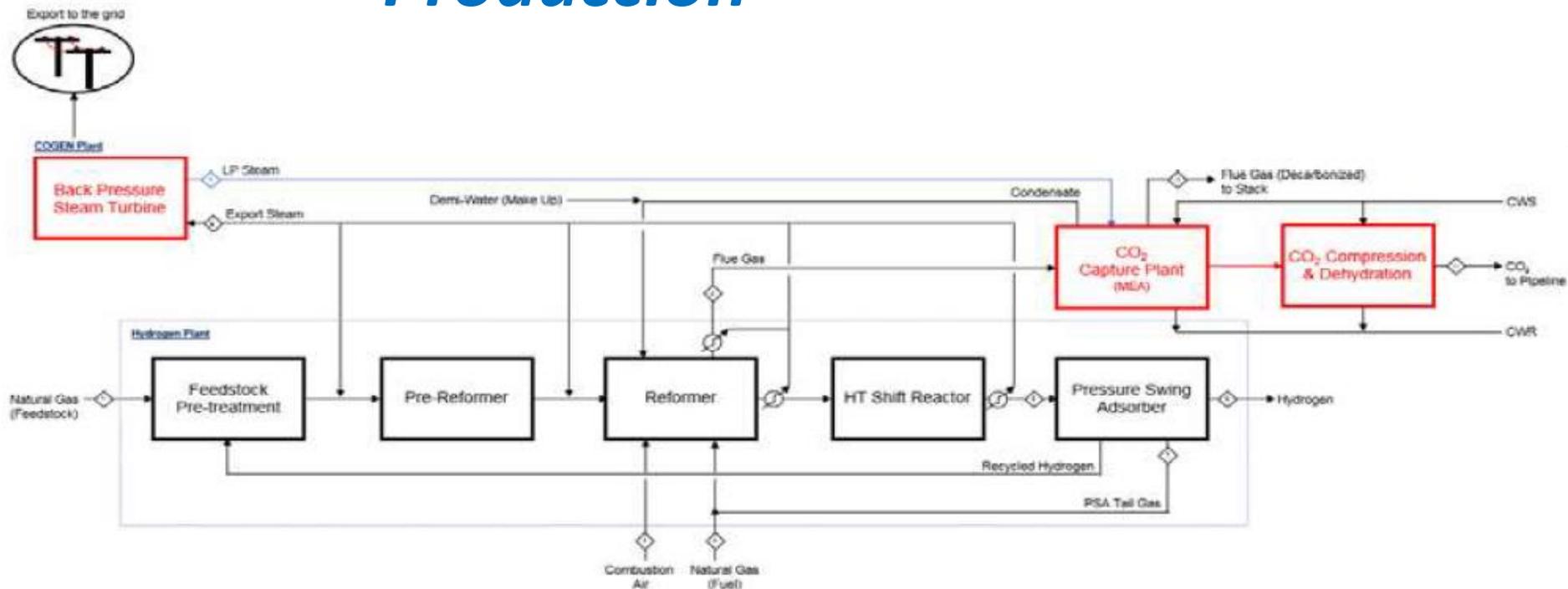
SMR: Reformado de biometano (sin captura de CO₂)

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

$$\left(\frac{1 \text{ kg H}_2}{116,1676 \text{ kg RSU}}\right) \cdot \left(\frac{485,9 \text{ kg RSU}}{1 \text{ pax}}\right) = 4,18 \text{ kgH}_2/(\text{pax} \cdot \text{año})$$



Hidrógeno DORADO Producción



[IEA, 2017]

Figure 6: Case 3 - SMR Plant with capture of CO₂ from SMR flue gas using MEA

- Producción H₂ por SMR: 2,285 kmol H₂/kmol CH₄ (69,1% de eficiencia)
- Producción de CO₂: ≈ 9,63 kg CO₂/kg H₂ (capturado 90%: **8,67 kg CO₂/kg H₂**)

Hidrógeno DORADO de FORSU

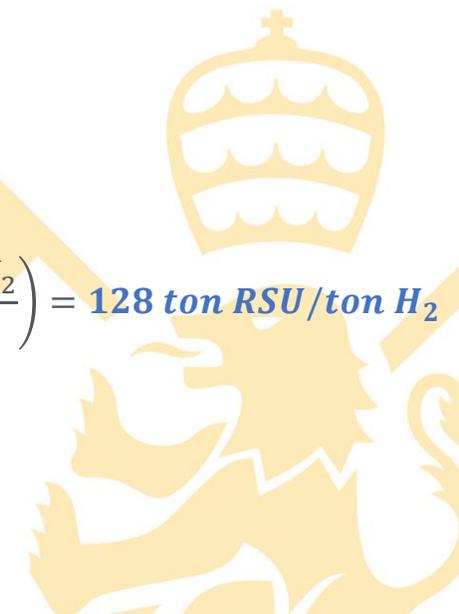
Producción

- 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 con captura de CO₂

$$\left(\frac{1 \text{ ton RSU}}{0,591 \text{ ton FORSU}}\right) \cdot \left(\frac{\text{ton FORSU}}{100 \text{ Nm}^3 \text{ biogás}}\right) \cdot \left(\frac{100 \text{ Nm}^3 \text{ biogás}}{65 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4}\right) \cdot \left(\frac{1 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4}{9,92 \text{ kWh CH}_4}\right) \cdot \left(\frac{100 \text{ kWh CH}_4}{69,1 \text{ kWh H}_2}\right) \cdot \left(\frac{33,6 \text{ kWh H}_2}{1 \text{ kg H}_2}\right) \cdot \left(\frac{1000 \text{ kg H}_2}{1 \text{ ton H}_2}\right) = 128 \text{ ton RSU/ton H}_2$$

$$\left(\frac{1 \text{ kg H}_2}{127,5994 \text{ kg RSU}}\right) \cdot \left(\frac{485,9 \text{ kg RSU}}{1 \text{ pax}}\right) = 3,81 \text{ kg H}_2/(\text{pax} \cdot \text{año})$$



Hidrógeno DORADO

Costes

- Costes de biogás y upgrading [[Feliu & Flotats, 2020](#)]
- Biogás de FORSU: 35 €/MWh
- Upgrading:

$$C_0^{ug} [\text{€/año}] = \begin{cases} 41,289 \cdot HP [\text{kg/año}] \cdot \left(Q_{bg} \left[\frac{\text{Nm}^3}{\text{h}} \right] \right)^{-0,704} & \text{si } Q_{bg} < 200 \text{ Nm}^3/\text{h} \\ 10,023 \cdot HP [\text{kg/año}] \cdot \left(Q_{bg} \left[\frac{\text{Nm}^3}{\text{h}} \right] \right)^{-0,365} & \text{resto} \end{cases}$$

- Leyes de escala basadas en correlaciones para SMR a partir de gas natural [[Lipman, 2004](#)]:
 - Sin captura CO₂: 175 ÷ 222.300 ton/año
 - Con captura CO₂: 8.760 ÷ 222.300 ton/año
- Ajuste para planta de 74.300 ton/año [[IEA, 2017](#)]

$$INV[\text{€}] = 417,68 \cdot \left(HP \left[\frac{\text{kg}}{\text{año}} \right] \right)^{0,713} + 19,079 \cdot \left(HP \left[\frac{\text{kg}}{\text{año}} \right] \right)^{0,87}$$

- Mantenimiento $C_0^m [\text{€/año}] = 0.186 \cdot HP [\text{kg/año}]$

[[Soler et al., 2022](#)]

HP: producción anual de Hidrógeno
Q_{bg}: caudal de biogás tratado



Hidrógeno desde biometano

Potencial

HIDRÓGENO VERDE (sin captura CO₂)

- Producción H₂ por SMR: 2,51 kmol H₂/kmol CH₄ (75,9% de eficiencia)
- Producción a partir de biometano: 22,6 kg H₂/MWh_{PCI}
- Producción a partir de fracción orgánica de RSU (FORSU): 4,18 kg H₂/(pax · año)
- Producción de CO₂: ≈ 8,8 kg CO₂/kg H₂

HIDRÓGENO DORADO (con captura CO₂)

- Producción H₂ por SMR: 2,285 kmol H₂/kmol CH₄ (69,1% de eficiencia)
- Producción a partir de biometano: 20,6 kg H₂/MWh_{PCI}
- Producción a partir de fracción orgánica de RSU (FORSU): 3,81 kg H₂/(pax · año)
- Producción de CO₂: ≈ 9,63 kg CO₂/kg H₂ (**capturado 90%: 8,67 kg CO₂/kg H₂**)



Hidrógeno DORADO de biometano. Potencial

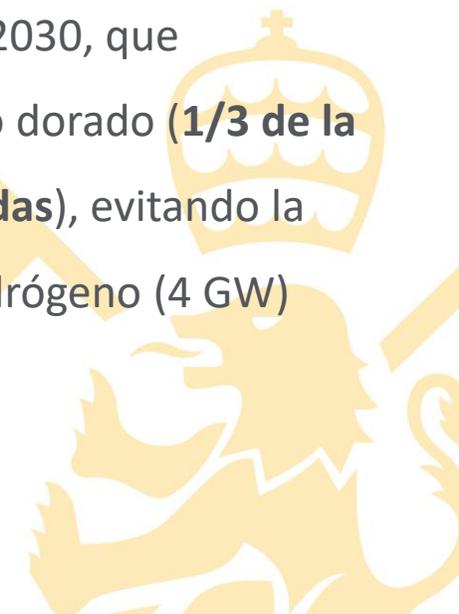
[Aplicación de GASNAM]



- **41.200 ton de hidrógeno dorado** (\approx 412 MW electrolizador)
- 357,2 kton de CO₂ compensadas
- Demanda actual de Hidrógeno en España (uso industrial): 600.000 ton/año
- **Se podría producir a partir de biometano a corto plazo el 7% de la demanda actual de hidrógeno**
- La **Hoja de Ruta del Biogás** prevé más de 10 TWh para 2030, que representarían más de **200.000 toneladas de hidrógeno dorado (1/3 de la demanda actual, con unas 1,8 Mton de CO₂ compensadas)**, evitando la **mitad de los electrolizadores de la Hoja de Ruta del Hidrógeno (4 GW)**

Proyectos biometano 2022

Explotación: 0,178 TWh
Construcción: 1,425 TWh \approx **2 TWh**
Planificados: 0,383 TWh



Hidrógeno DORADO con FORSU *Potencial*

- 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 H₂/año**
 - Emisiones de CO₂ negativas: 1.564 kton CO₂/año (**0,5% España en 2019**)
 - Equivalencia en electrólisis (5.800 heq/año): 1.804 MW = 1,8 GW
- Demanda actual de Hidrógeno en España (uso industrial): 600.000 ton/año
- **Se podría producir a partir de FORSU el 30% de la demanda actual**
- La Hoja de Ruta del Hidrógeno Renovable Española prevé en 2030 4 GW de electrolizadores
- **El Hidrógeno de la FORSU permitiría reducir la potencia de electrolizadores en un 45%**



Hidrógeno DORADO de FORSU

Costes

$$LCOH = \frac{INV \cdot CRF + C_0^{bg} \cdot CELF_{bg} + C_0^{ug} \cdot CELF_{ug} + C_0^{om} \cdot CELF_{om} - C_0^{CO2} \cdot CELF_{CO2}}{HP}$$

$$CRF = \frac{wacc \cdot (1 + wacc)^{Ny}}{(1 + wacc)^{Ny} - 1}$$

$$CELF_x = \left[\frac{k_x \cdot (1 - k_x^{Ny})}{1 - k_x} \right] \cdot CRF$$

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

