

La industria electrointensiva como facilitadora de almacenamiento eléctrico para la red

Proyectos para un aluminio más sostenible

José Ignacio Linares, Eva Arenas, María José Montes, José Rubén Pérez Domínguez, Alexis Cantizano, José Luis Becerra
Cátedra Rafael Mariño de Nuevas Tecnologías Energéticas

1. Industria del aluminio: ejemplo de industria electrointensiva
2. Evolución del concepto de cogeneración
3. Resultados obtenidos
4. Conclusiones

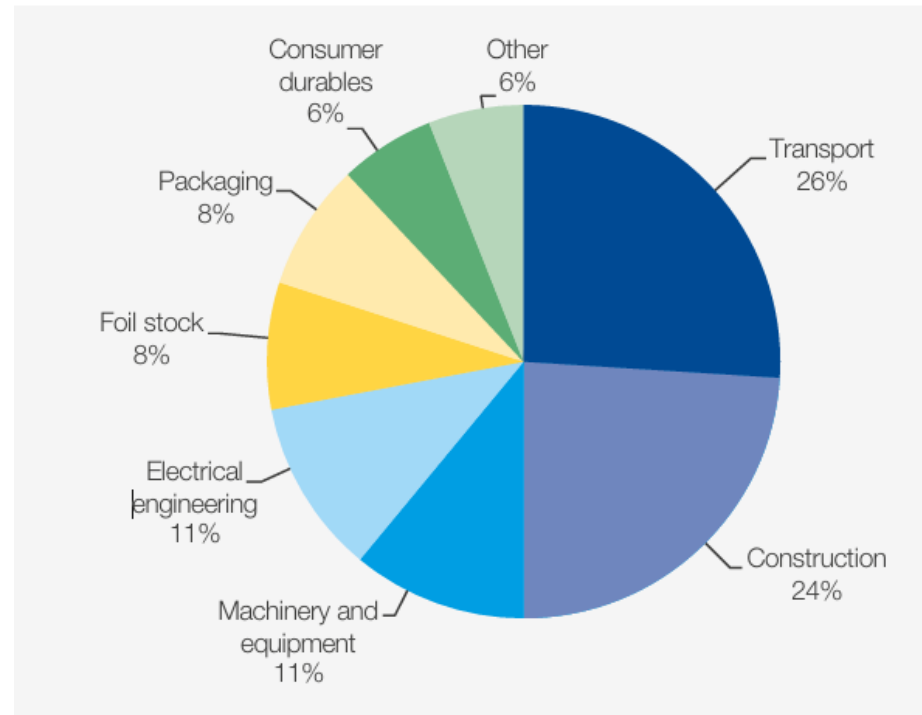


- 1. Industria del aluminio: ejemplo de industria electrointensiva**
- 2. Evolución del concepto de cogeneración**
- 3. Resultados obtenidos**
- 4. Conclusiones**



Industria del aluminio

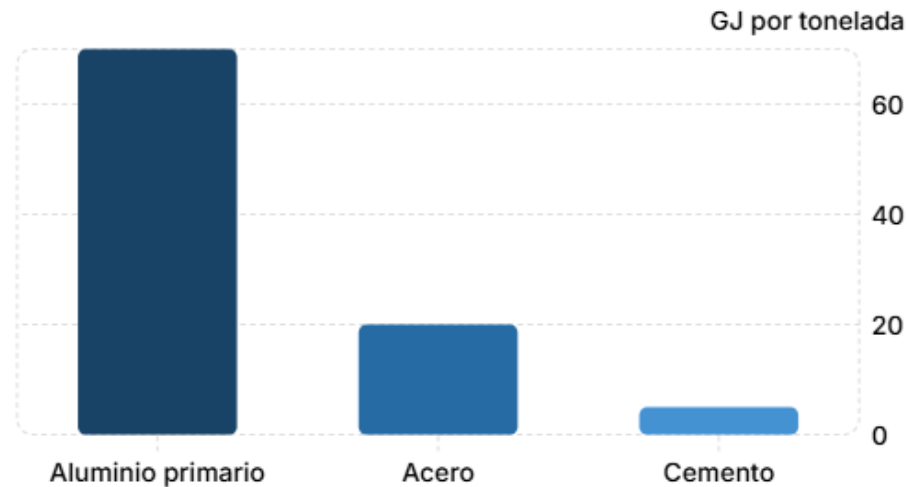
- ✓ La producción mundial de aluminio primario en 2025 fue de **74 millones de toneladas**, con una previsión de crecimiento del 40% en 2030.
- ✓ El aluminio es muy apreciado por su **baja densidad** y su **alta relación resistencia-peso**.



Fuente: [World Economic Forum. Aluminium for Climate: Exploring pathways to decarbonize the aluminium industry](#)

Industria del aluminio: electrointensiva

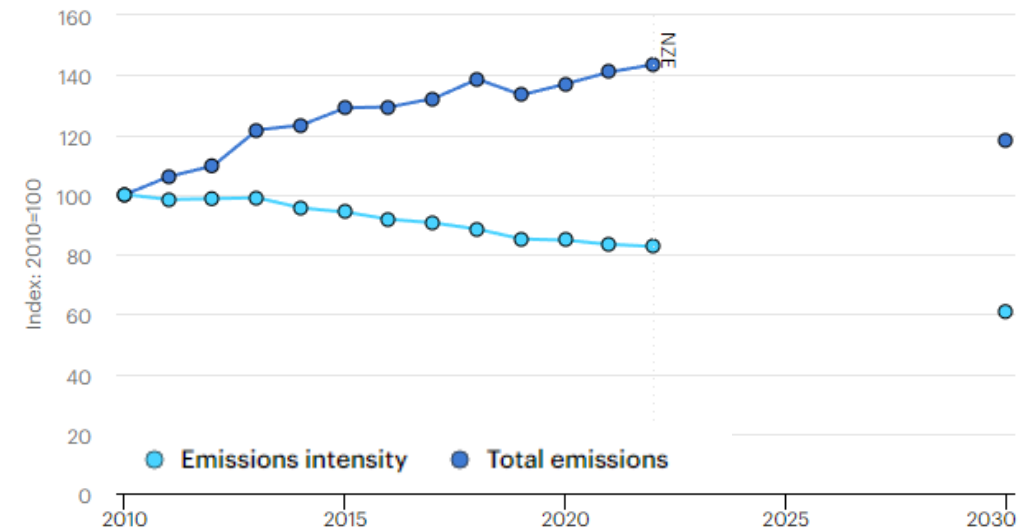
- ✓ El sector del aluminio es uno de los sectores industriales **más intensivos en energía**, especialmente **electricidad**, que supone en torno al 80%.
- ✓ La intensidad energética del aluminio primario es de unas **70 GJ por tonelada**, lo que lo hace **más intensivo en energía que el acero y el cemento** en términos de unidad producida.
- ✓ A pesar de ello, tiene **menor peso agregado en Europa** porque los volúmenes producidos son mucho menores que los del acero o el cemento.



Fuente: Elaboración propia con datos de AIE

Industria del aluminio: emisiones

- ✓ La producción de aluminio fue responsable de **1100 millones de toneladas de CO₂-e** en 2024, en torno al **3% de las emisiones totales a nivel mundial**.
- ✓ Esto es **menos que el acero y el cemento** (aprox. un 8% cada uno). Sin embargo, la producción de aluminio es mucho menor.
- ✓ Cada tonelada de aluminio primario producida emite unas **15 toneladas de CO₂-e**.



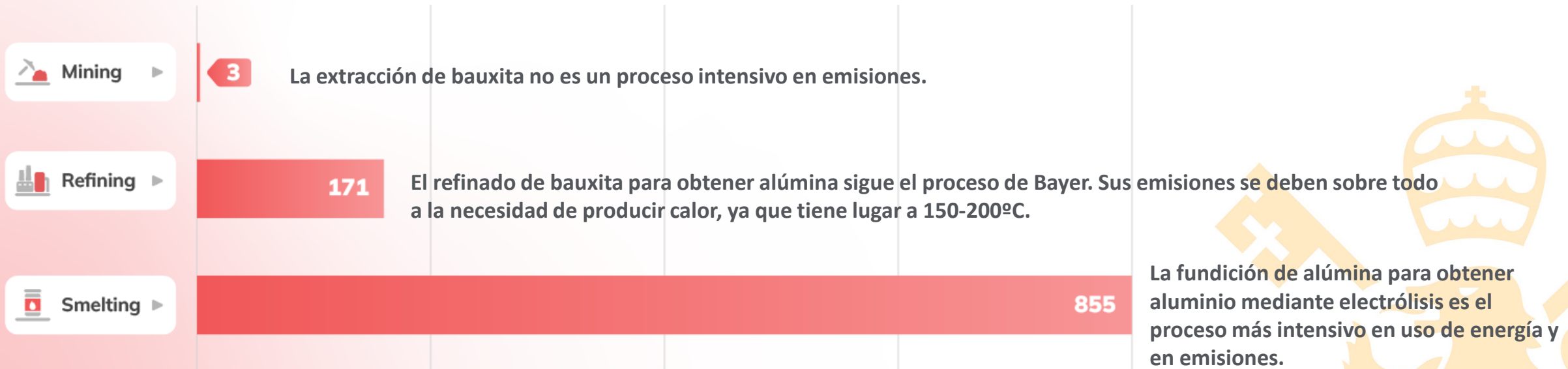
Fuente: AIE. Industria del aluminio

Producción de aluminio: emisiones

- ✓ La producción de aluminio primario sigue tres pasos: la extracción del mineral de **bauxita**, su refinado para producir **alúmina** y la **fundición** para obtener aluminio.

Emissions from Aluminum Production

(million tonnes CO2)

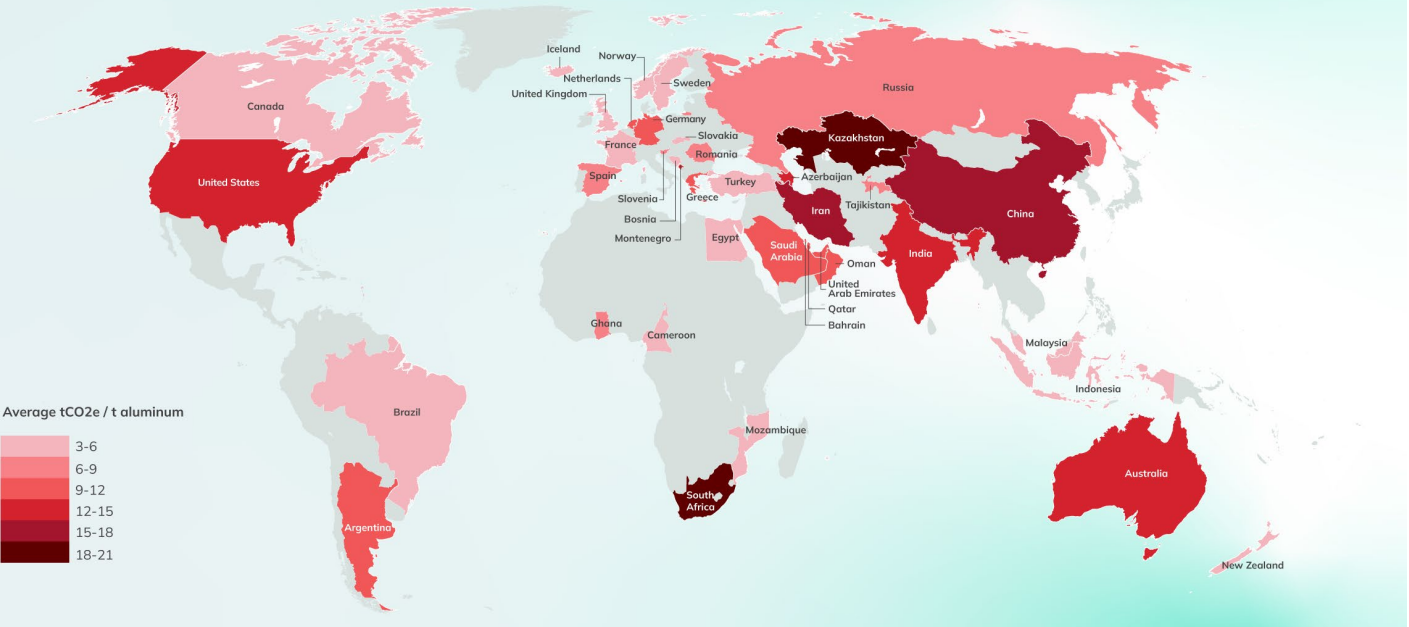


Source: 2018 data from International Aluminium Institute: <https://international-aluminium.org/statistics/greenhouse-gas-emissions-aluminium-sector/>

Industria del aluminio: electrointensiva

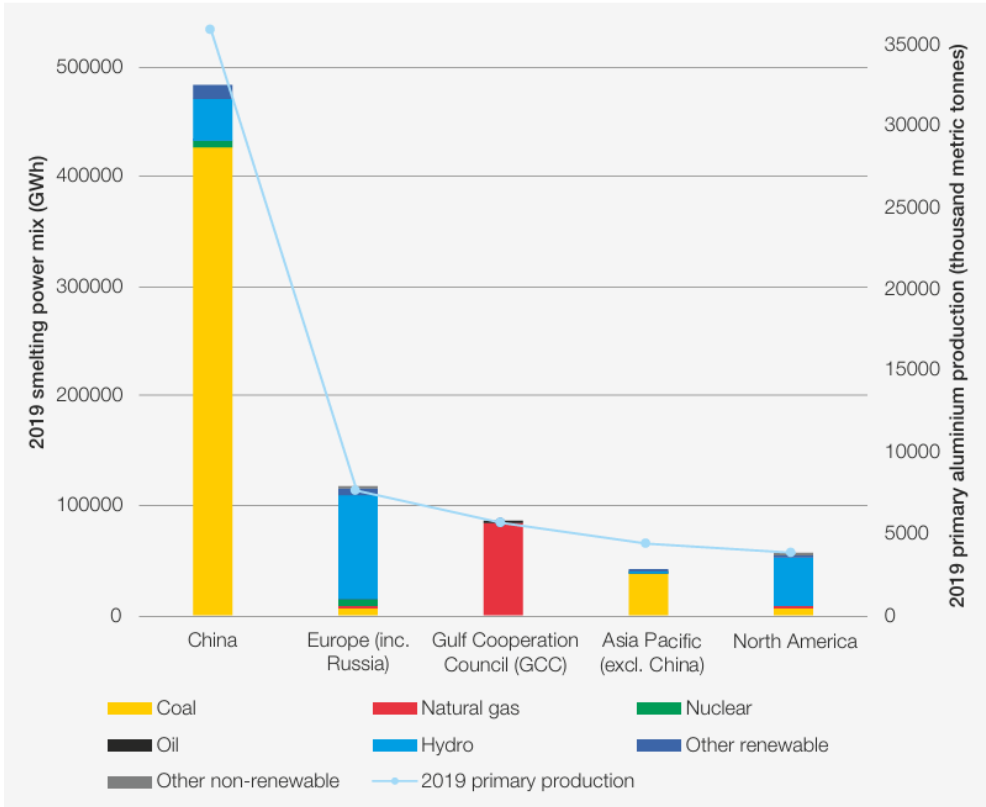
✓ Según el origen de la electricidad utilizada en la electrólisis, así se producen más o menos emisiones.

Average aluminum intensity by country

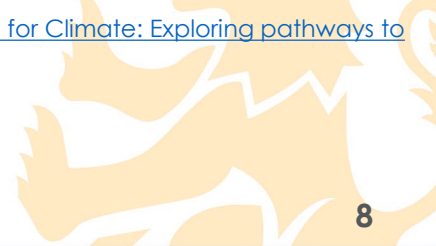


Fuente: Carbon chain

Global power mix and primary aluminium production (2019)³⁶



Fuente: World Economic Forum. Aluminium for Climate: Exploring pathways to decarbonize the aluminium industry



Industria del aluminio: electrointensiva

- ✓ La producción de **aluminio primario** forma parte de la denominada industria electrointensiva.
- ✓ Sector metalúrgico, químico, siderúrgico, gases industriales, industria vidriera e industrias extractivas.
- ✓ Suponen el **7% de la demanda anual eléctrica peninsular**.
- ✓ En el estudio que presentamos a continuación, se convierten en **almacenamiento para la red**, apareciendo la oportunidad de **aprovechar los vertidos de renovables**.

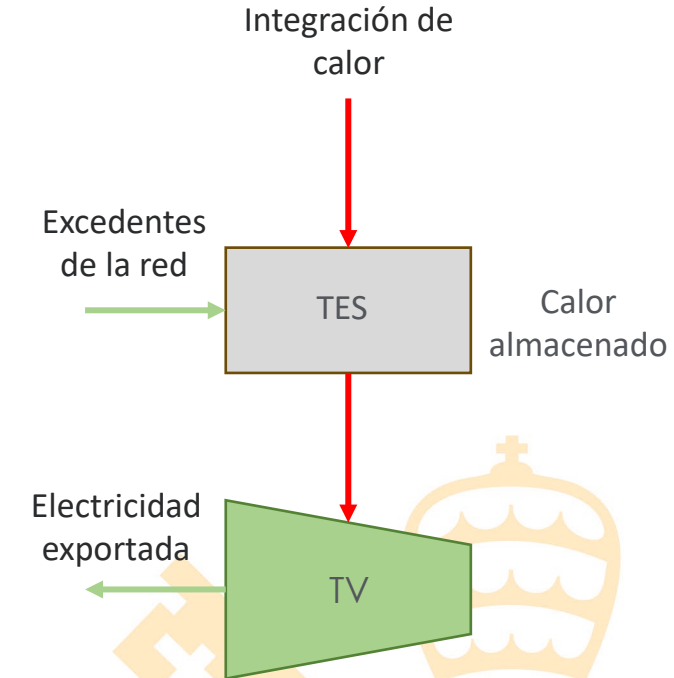


1. **Industria del aluminio: ejemplo de industria electrointensiva**
2. **Evolución del concepto de cogeneración**
3. **Resultados obtenidos**
4. **Conclusiones**



Almacenamiento de energía electro-térmica (ETES)

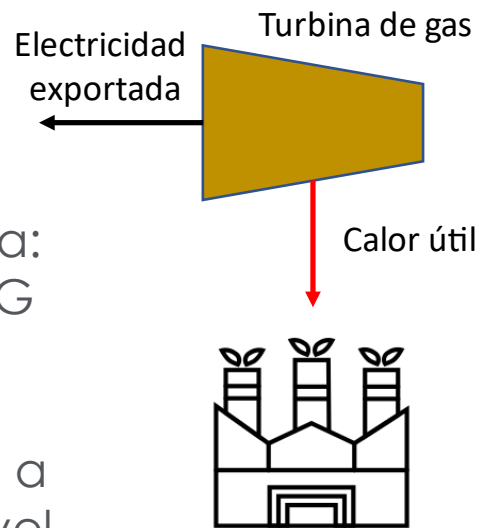
- ✓ Tecnología que convierte **electricidad en energía térmica** para su almacenamiento y posterior uso. Pertenece al concepto más general de **batería de Carnot**.
- ✓ El **TI-ETES** (Thermally Integrated Electro-Thermal Energy Storage) es una variante **avanzada**, en el que además de cargar el sistema de almacenamiento con calor procedente de electricidad, se carga aprovechando un foco de **calor residual**.
- ✓ El calor almacenado se utiliza después para alimentar un **ciclo de potencia**.
- ✓ Si el sistema de carga (lo más sencillo, una resistencia) se sustituye por una **bomba de calor**, tendríamos un **PTES** (Pumped-Thermal Energy Storage), o un **TI-PTES** en su versión avanzada.



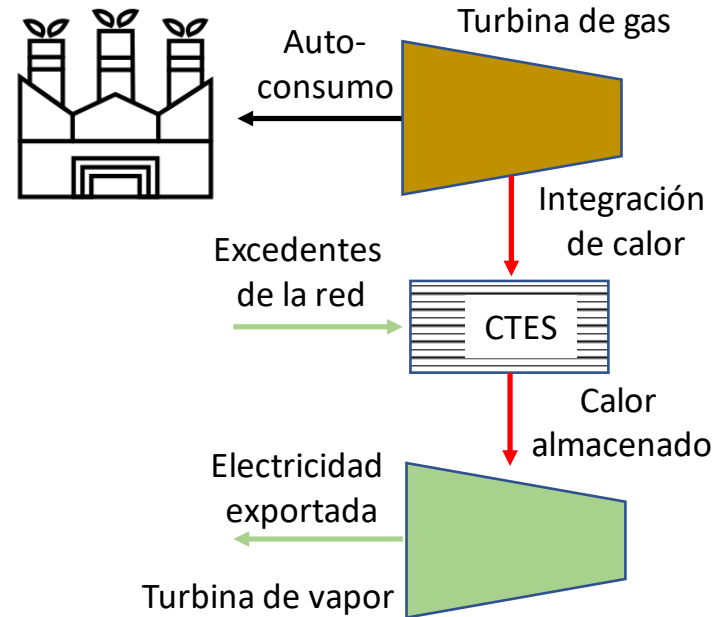
Evolución del concepto de cogeneración

- La industria **electrointensiva** supone una **demanda de electricidad continua y elevada**.
- Integrando un ETES, la industria se convierte en un **almacenamiento de larga duración** (>13 horas) para la red.

Industria **TERMO**intensiva: el calor residual de la TG se recupera para suministrar calor y la electricidad se exporta a la red, con un cierto nivel de autoconsumo



COGENERACIÓN CONVENCIONAL
(industria termointensiva)



COGENERACIÓN AVANZADA
(industria electrointensiva)

Industria **ELECTRO**intensiva: la electricidad de la TG alimenta a la industria (o a una microrred industrial) y el calor se almacena junto con excedentes de la red

Evolución del concepto de cogeneración

- ✓ Se redefine el concepto de cogeneración:

Combined Heat & Power CHP

- Autoconsumo de una parte de la **electricidad** producida por el grupo cogenerador, **exportando** el resto.
- **Consumo de todo el calor** recuperable del grupo (situación ideal para maximizar la eficiencia).



Combined Grid Storage & Power CGSP

- **Autoconsumo** del 100% de la **electricidad** de la turbina de gas.
- El calor residual se envía al **almacén térmico**.
- En la fase de carga se consume **electricidad de la red**
- En la fase de descarga **se exporta electricidad** a la red a través de la turbina de vapor
- Punto de acceso eléctrico: por él se tomarían los **excedentes de red** y se evacuaría la **producción de la turbina de vapor**.

$$REE = \frac{E_{TG}}{\frac{E_{TG}}{0.411} - \frac{V}{0.9}}$$

$$REE = \frac{E_{TG} + E_{TV} - E_{red}}{\frac{E_{TG}}{0.411} - \frac{E_{TV}}{0.53}}$$

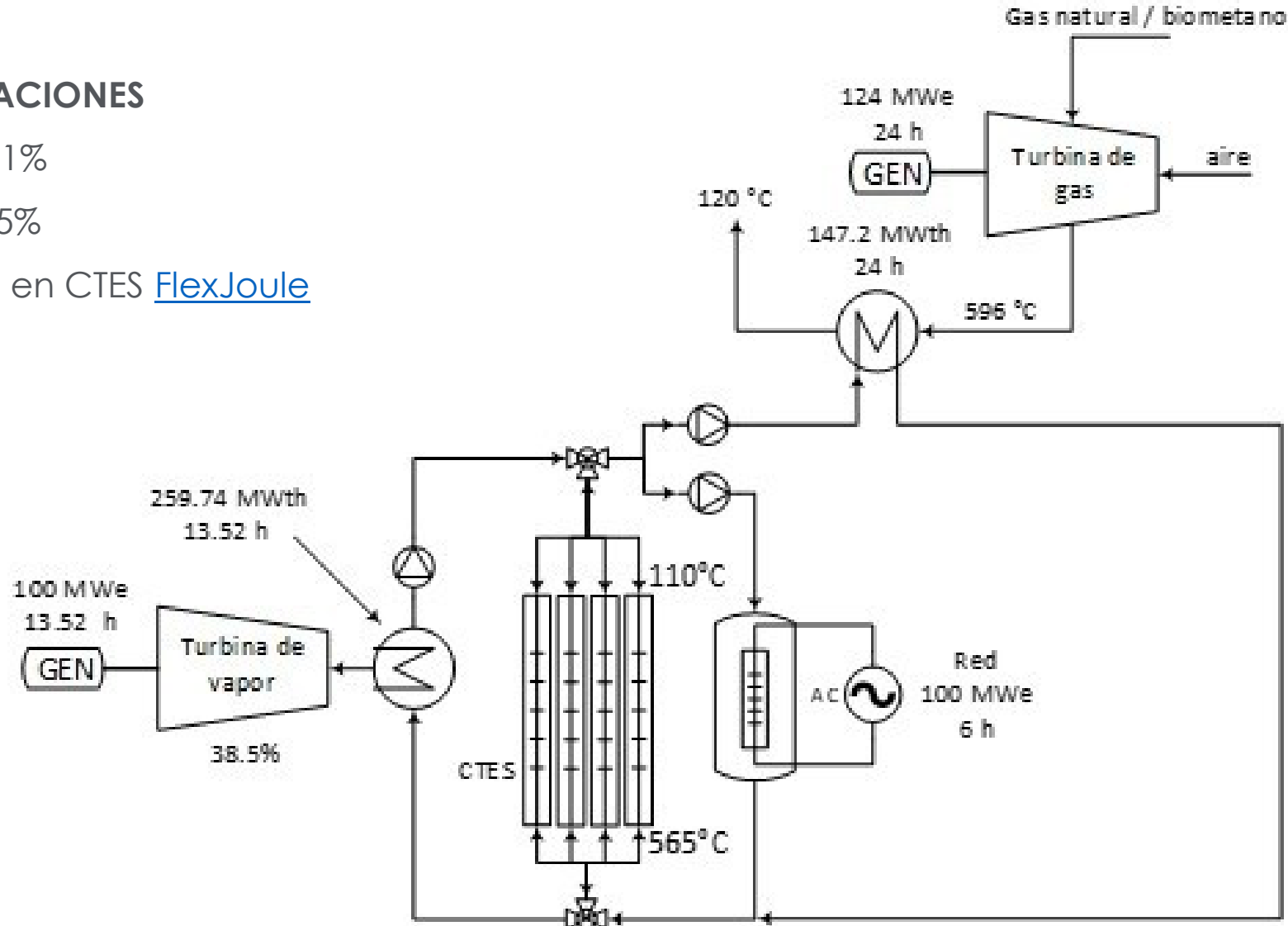
1. Industria del aluminio: ejemplo de industria electrointensiva
2. Evolución del concepto de cogeneración
3. Resultados obtenidos
4. Conclusiones



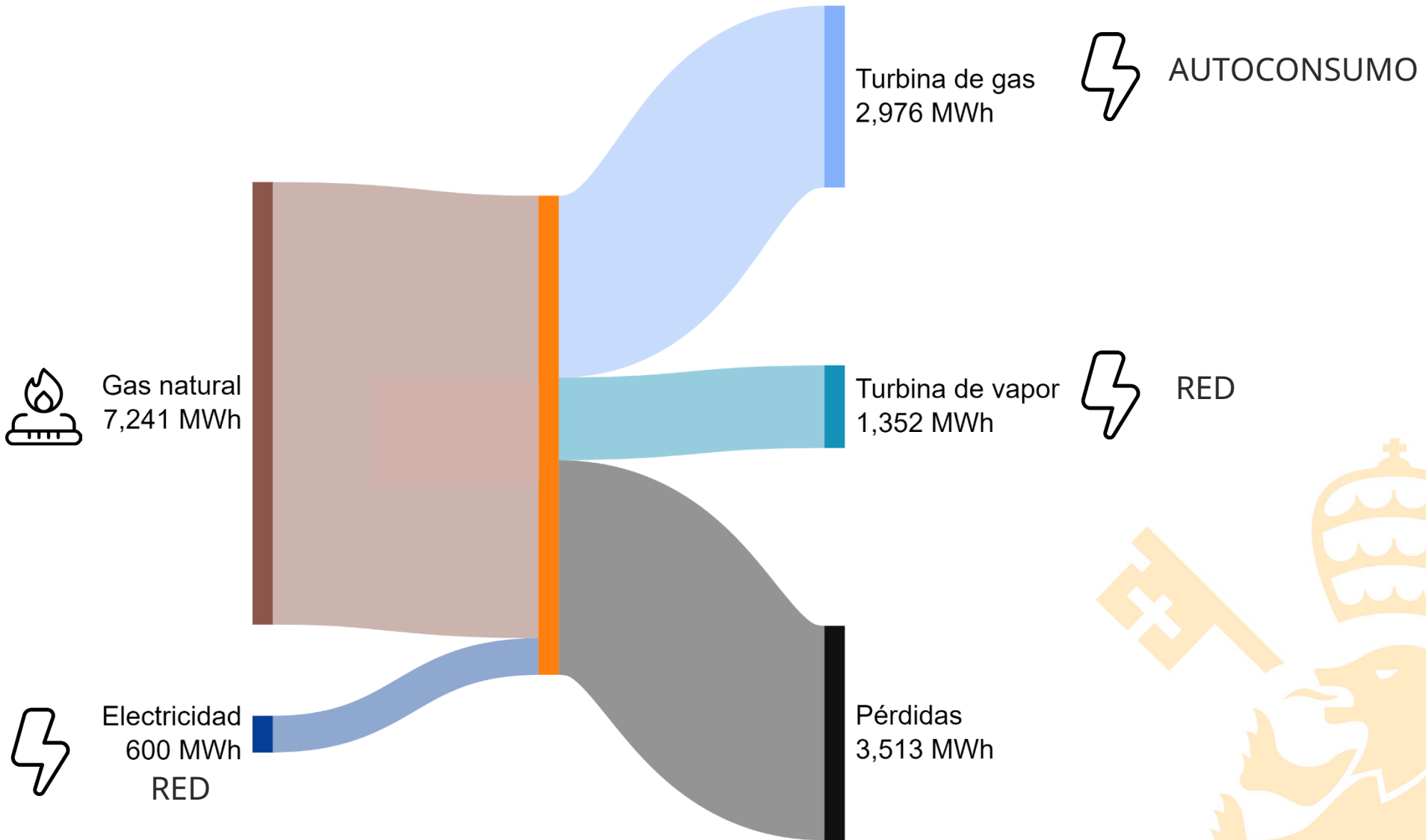
Esquema, hipótesis y resultados

PRESTACIONES

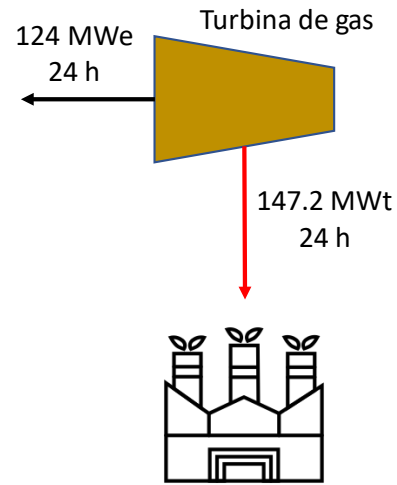
- Eficiencia TG: 41.1%
- Eficiencia TV: 38.5%
- TES: 85%, basado en CTES [FlexJoule](#)



Balance de energía diario

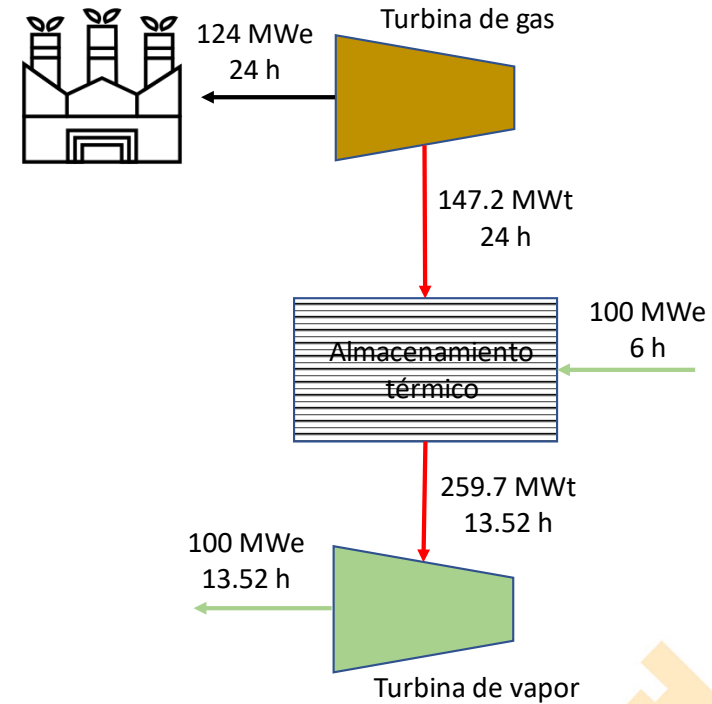


Comparación con cogeneración convencional



$$REE = \frac{2976}{\frac{2976}{0.411} - \frac{3523}{0.9}} = 89.47\%$$

COGENERACIÓN CONVENCIONAL (CHP)
(industria termointensiva)

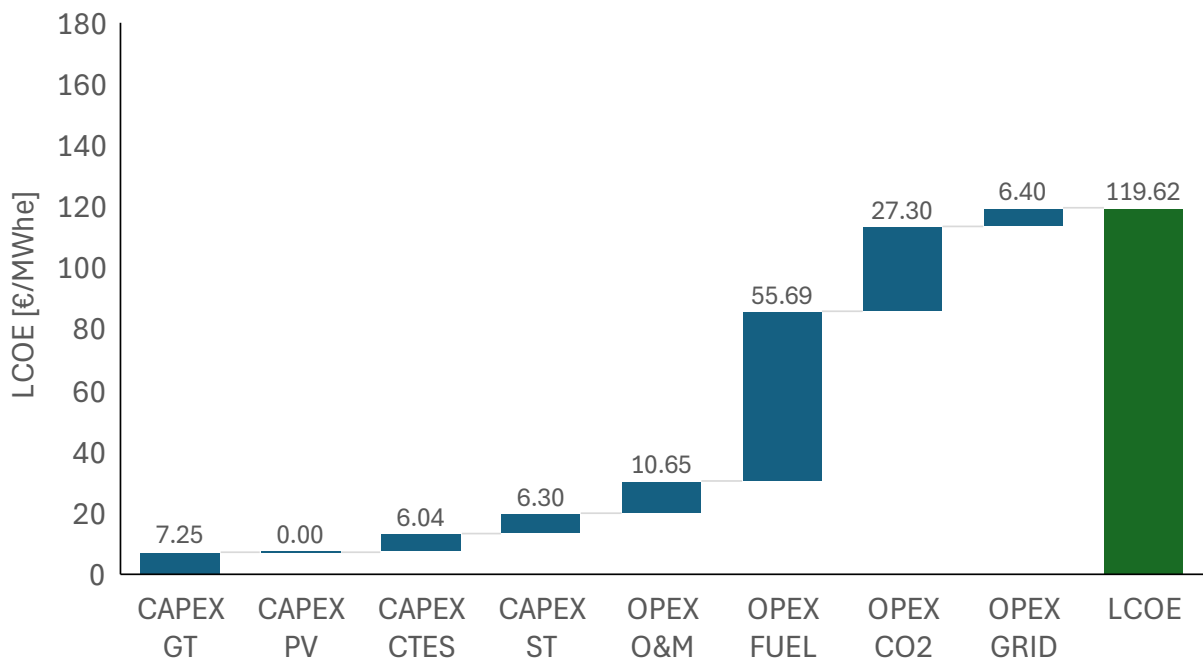


$$REE = \frac{2976 + 1352 - 600}{\frac{2976}{0.411} - \frac{1352}{0.53}} = 79.49$$

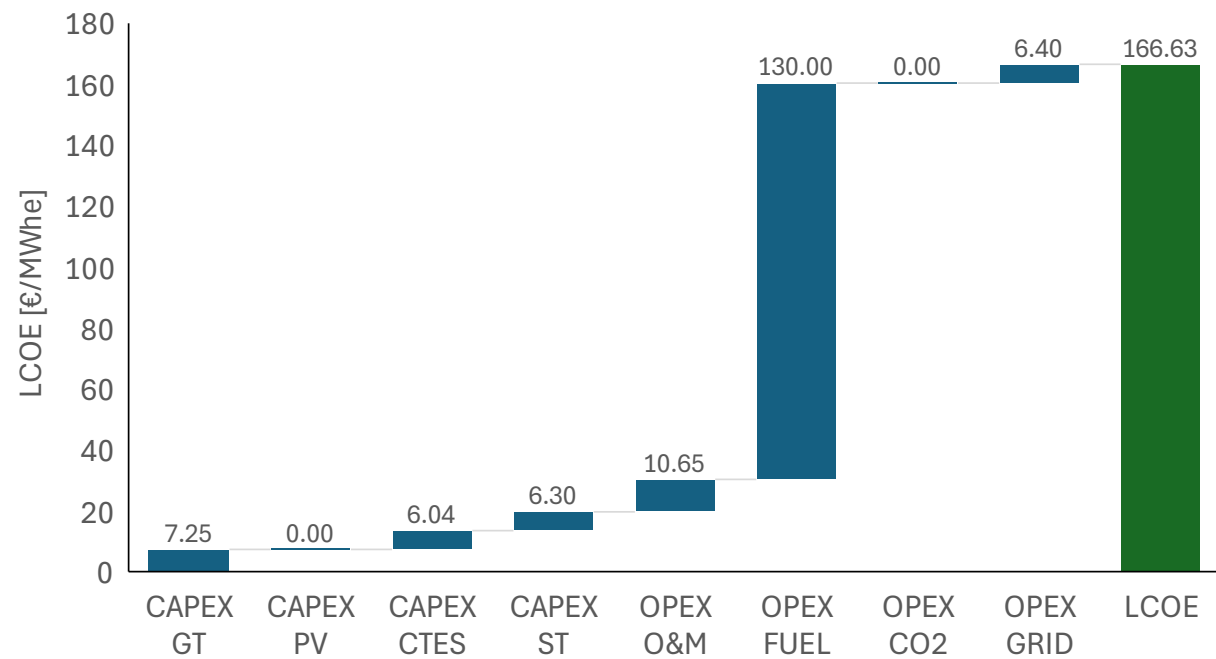
COGENERACIÓN AVANZADA (CGSP)
(industria electrointensiva)

Resultados económicos

gas natural



biometano



- Coste GN: 30 €/MWh-PCS
- Coste biometano: 70 €/MWh-PCS
- Tasa CO₂: 80 €/t CO₂
- Coste electricidad carga: 46.16 €/MWh

HIPÓTESIS

- wacc: 7.5%
- 25 años
- $f_{\text{CO}_2 \text{ grid}} = 70 \text{ g CO}_2/\text{kWh}$
- $f_{\text{CO}_2 \text{ gn}} = 204 \text{ g CO}_2/\text{kWh}$

Resultados separados por servicios

✓ El LCOE calculado incluye tanto la operación de **la turbina de gas** como del **sistema de almacenamiento y la producción de la TV**.

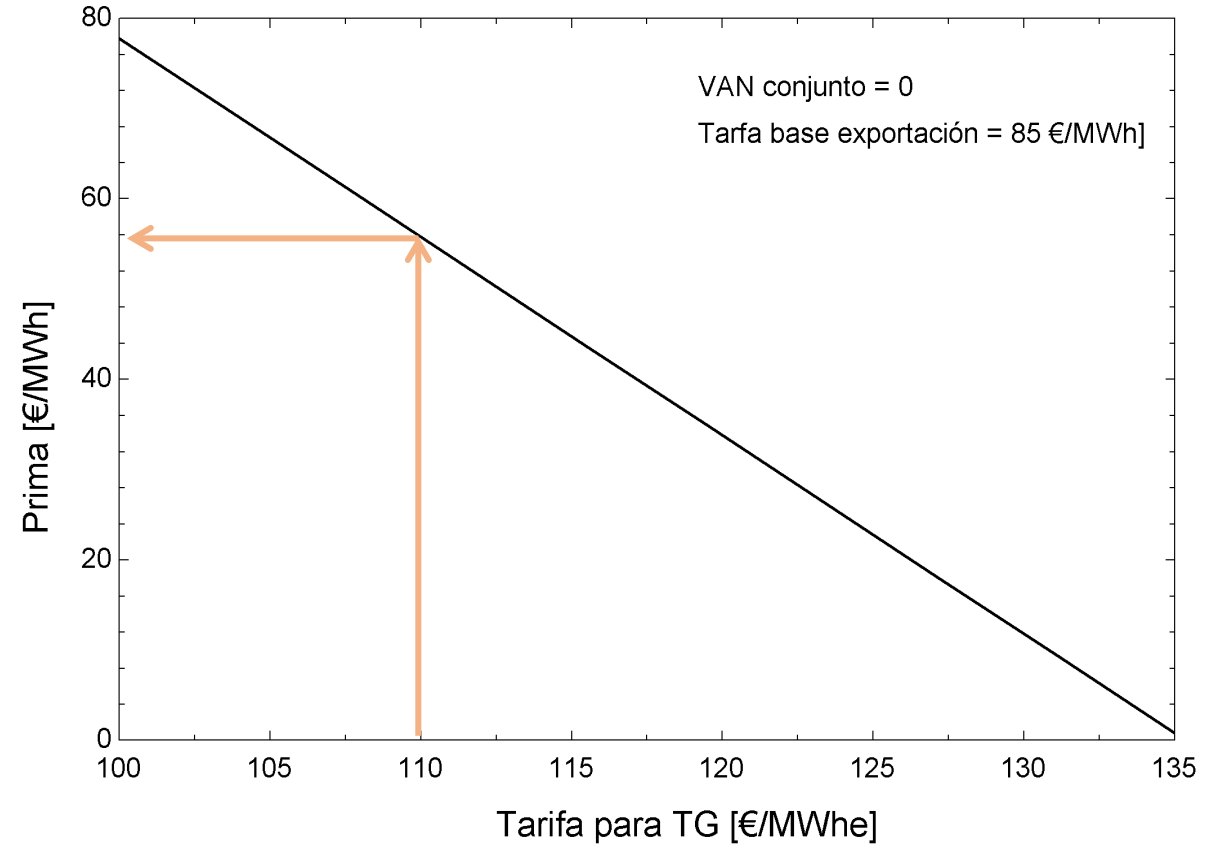
✓ Se puede separar en dos servicios con sus propias tarifas:

Tarifa para la industria (TG) + Tarifa para exportación a red (TV)

- ✓ La industria electrointensiva paga una tarifa por la electricidad en autoconsumo
- ✓ La electricidad exportada a la red (TV) recibe **el precio de mercado más una prima por el servicio de almacenamiento**.



Alternativa al bonus actual de las industrias electrointensivas



Ejemplo:

- Tarifa para la industria: 110 €/MWh
- Prima a la electricidad exportada: 56 €/MWh, para que con los 85 €/MWh del mercado se alcance un VAN = 0

1. Industria del aluminio: ejemplo de industria electrointensiva
2. Evolución del concepto de cogeneración
3. Resultados obtenidos
4. Conclusiones



Conclusiones

- ✓ El **TI-ETES** permite transformar una demanda eléctrica constante en un **activo de almacenamiento de larga** duración para la red.
- ✓ El sistema permite redefinir la cogeneración en industrias electrointensivas, combinando **autoconsumo eléctrico, recuperación térmica y almacenamiento** para la red.
- ✓ La solución se basa en **tecnologías comerciales**, siendo el punto débil del sistema el **consumo de gas**.
- ✓ El carácter **renovable** vendría por el uso de **biometano como combustible**, si bien a corto plazo requeriría una alimentación híbrida dada la escasez del mismo.
- ✓ El marco regulatorio podría evolucionar hacia **primas por servicio de almacenamiento**, reforzando la sinergia entre industria y red eléctrica.



GRACIAS POR SU ATENCIÓN

earenas@comillas.edu

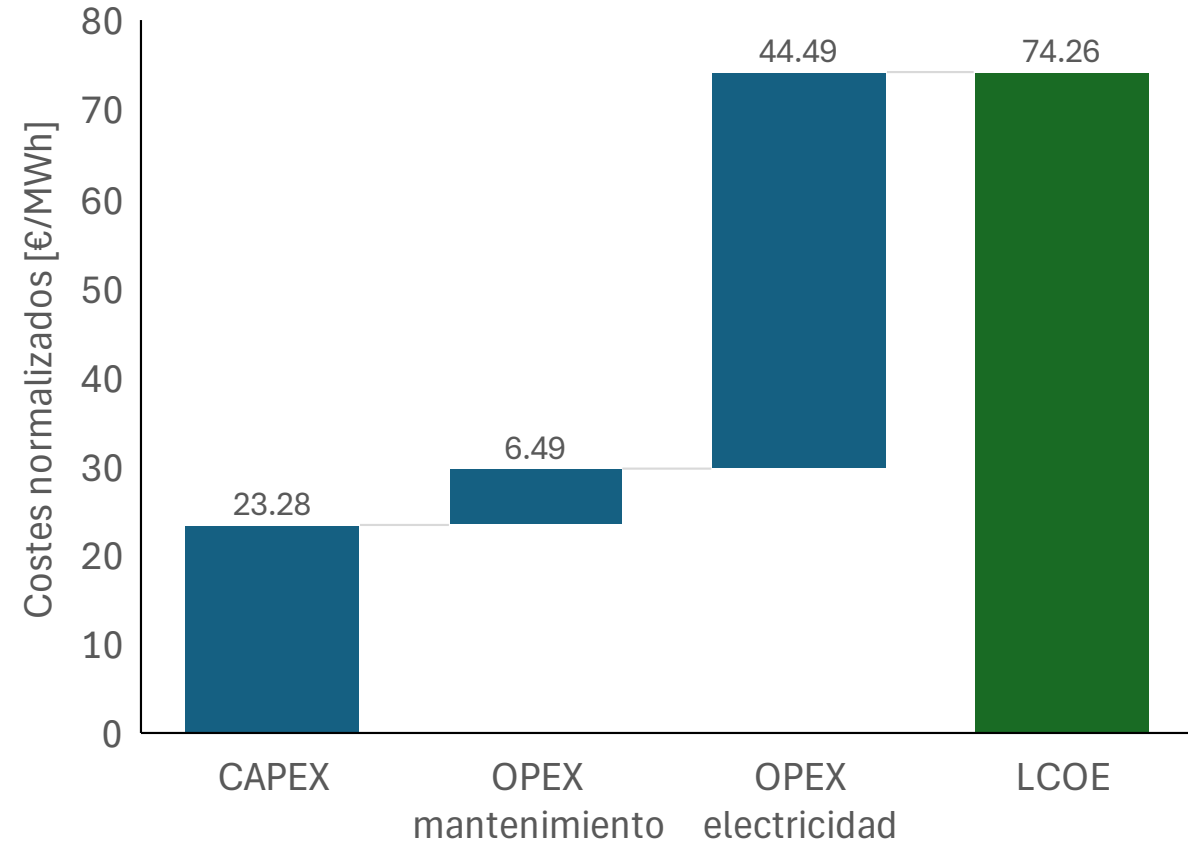


Aplicación a ciclos combinados

- ✓ El anterior sistema constituye en definitiva **un ciclo combinado** donde la **TV opera en diferido**, y que está pensando para que la **TG satisfaga la demanda de una industria electrointensiva**
- ✓ Otra alternativa es tomar un **ciclo combinado existente** y realizar las siguientes modificaciones:
 - Intercalar un **CTES entre los gases de la TG y el HRSG**
 - Tener en cuenta la **operativa actual** de los ciclos combinados ([1362 horas/año en 2024](#))
 - Añadir una **resistencia eléctrica** y **cargar el TES con excedentes** de red 6 h/día
 - **Exportar a red la electricidad de la TG** durante 4 a 6 horas/día y **cargar el TES** con el calor de sus gases
 - Obtener las horas posibles de exportación a red de la **TV alimentada por el TES**

Resultados económicos

- Resistencia de 120 MW
- Tarifa de carga: 46.16 €/MWh
- 5 horas de TG
- Índices energéticos:
 - Electricidad tomada de la red: 720 MWh
 - Calor de los gases de escape: 1563 MWh
 - Electricidad descargada: 747.1 MWh
 - % electricidad red / descarga: 31.5%
 - RTE: 1.038 p.u.
 - Eficiencia: 52.34%
 - Horas de descarga: 6.21



Bibliografía

- [Aplicación a centros de datos](#)
- [Aplicación a la industria electrointensiva](#)
- [Aplicación a ciclos combinados](#)

