LA INGENIERIA FRENTE A LOS RETOS ENERGÉTICOS Y CLIMÁTICOS

Organiza ACOFI, JORNADA ACADÉMICA

Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería

Conferencia: La energía en la formación del ingeniero en Colombia, vacíos y retos

Andrés Adolfo Amell Arrieta

andres.amell@udea.edu.co

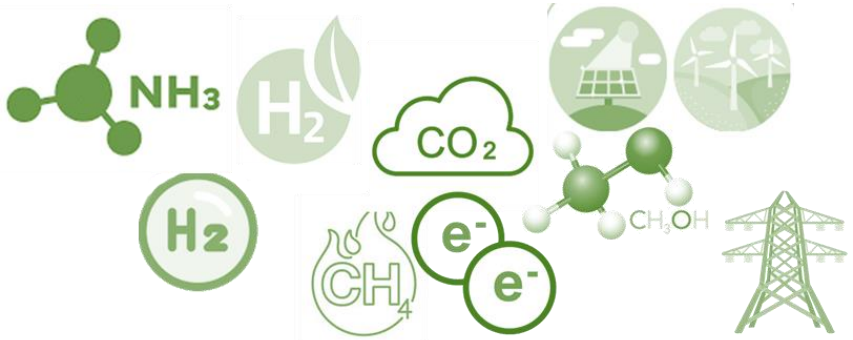
Coordinador del grupo GASURE, docente e investigador UdeA

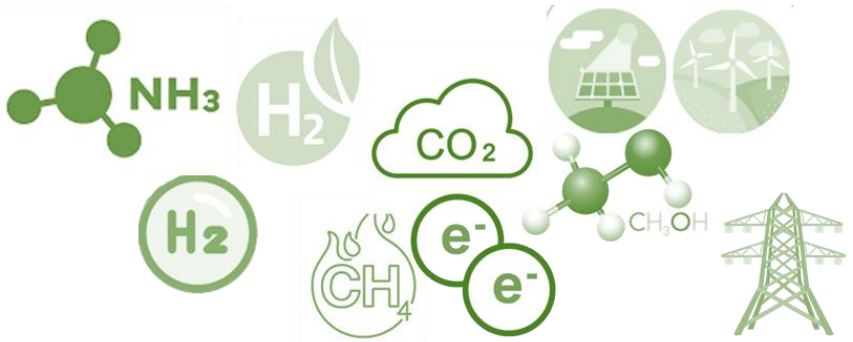
http://gasure.udea.edu.co/

Facultad de Ingeniería Mecánica

Universidad de Antioquia

Envigado, marzo 20/2025





UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA
Facultad de Ingeniería

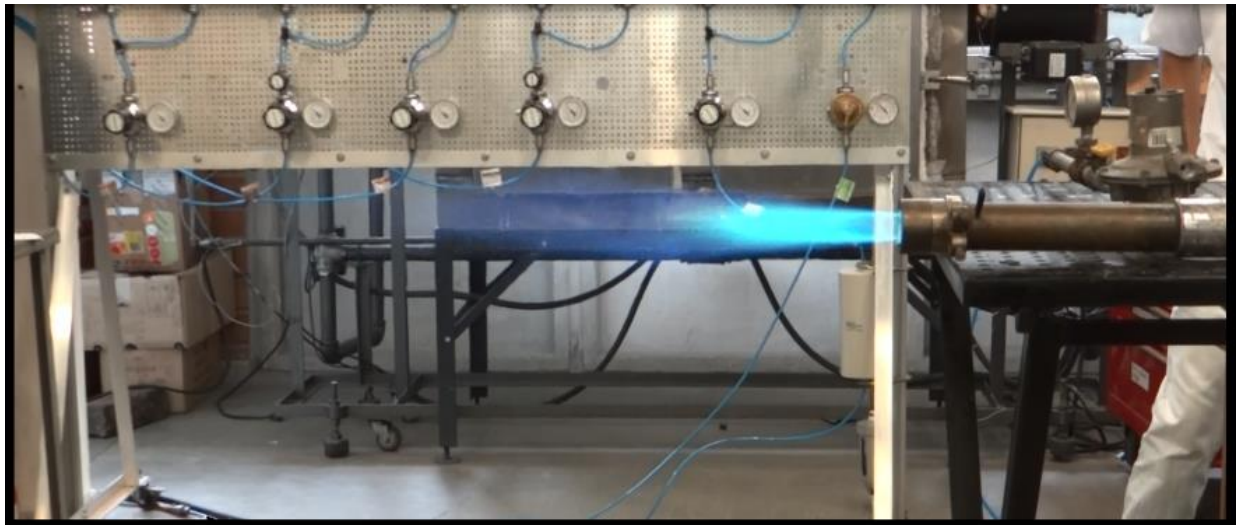
GASURE
Grupo de Ciencia y Tecnología del Gas y Uso Racional de la Energía

Agenda

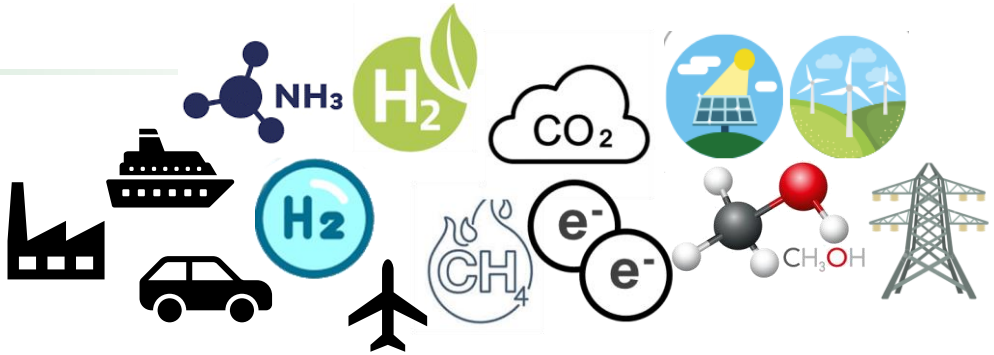
1 - Conceptos básicos para el análisis.

2 - Vacíos en la enseñanza de la energía en la ingeniería.

3 - La ingeniería ante los retos energéticos.



Fuente: *Foto Laboratorio de Combustión, Facultad de Ingeniería, UdeA.*



"En el desarrollo histórico de la humanidad la energía ha sido la fuente motora para el progreso material y el mejoramiento de las condiciones de vida. No es posible concebir el mundo sin energía. Ella en sus diferentes formas y manifestaciones hace posible las transformaciones y procesos evolutivos en la naturaleza, su empleo es indispensable y generalizado en las actividades productivas, en la agricultura, en el transporte y los hogares. Un mundo sin energía sería un estado estacionario y permanente".

Andrés Amell. *"Editorial: El trabajo académico sobre la energía en la Facultad de Ingeniería". Revista Facultad de Ingeniería – Universidad de Antioquia. 2002.*

1. Conceptos básicos : Componentes de un sistema energético

Energía primaria

- Fósil
- Renovables
- Nuclear

Centros de conversión

- Generación de electricidad
- Refinerías
- Plantas combustible sintético
- Generación de calor
- Poligeneración
- Plantas tratamiento gas natural

Energía final*

Electricidad

Gasolina motor
Gasolina aviación
Diesel
Gas Natural
Hidrógeno
Biocombustibles
Calor

Energía térmica

Transporte y distribución*

Líneas transmisión y distribución: EE
Planta licuefacción, buques metaneros, planta regasificación: GNL
Gaseoductos: GN
Oleoductos: petróleo
Poliductos: derivados petróleo
Buques petroleros
Trenes y buques carboneros

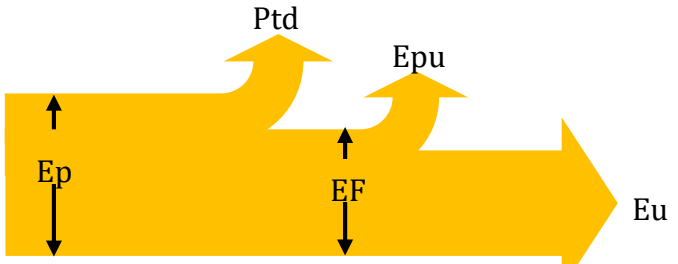
Sectores de uso final*

- Industria
- Residencial
- Transporte
- Servicios

Demanda de servicio de uso final

Cocción
Calentamiento de agua
Enfriamiento
Aire acondicionado
Calefacción
Movilidad
Calentamiento de materiales
Transformación de materiales
Producción de vapor
Tracción
etc.

*** Almacenamiento de energía**



Adaptado de: *Sovacool, Benjamin K. "Contestation, contingency, and justice in the Nordic low-carbon energy transition." Energy Policy 102 (2017): 569-582.*

Adaptado de: *Sovacool, Benjamin K. "Contestation, contingency, and justice in the Nordic low-carbon energy transition." Energy Policy 102 (2017): 569-582.*

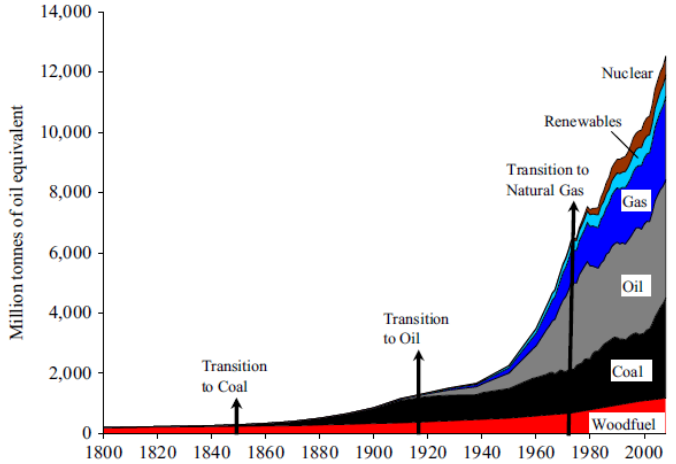
1. Conceptos básicos : ¿Qué es una Transición Energética?

- La transición energética (TE) es un cambio radical en el sistema energético de un modelo existente a un nuevo paradigma, con impactos económicos y rol de nuevos actores
- Las TEs no han sido sustitutivas, si no acumulativas, los nuevos energéticos coexisten con los que estuvieron vigentes.
- La celeridad e impacto de las TEs dependen de las condiciones especificas de los países y regiones:
  - El stock de recursos energéticos y materiales críticos.
  - Disponibilidad para proyectos costa afuera (off-shore) y restricciones.
  - Las condiciones ambientales.
  - Historia y cultura.
  - Condiciones económicas y sociales de las poblaciones.
  - Las condiciones y recursos fiscales de los estados.
  - Las políticas para beneficios en incentivos para estimular la transición.
- Vista por regiones, las TEs es un proceso desigual y combinado: Europa, California y Asia.
- Cualidades y atributos de las fuentes de energía y su incidencia en la ocurrencia de sustituciones absolutas.

- Densidad de energía
- Disponibilidad temporal y espacial
- Entropía ambiental y social
- Renovabilidad

Cualidades y atributos de los energéticos

Fuente: *Andrés Amell. Conferencia ExpoIngeniería. UdeA, Medellín. 2020*



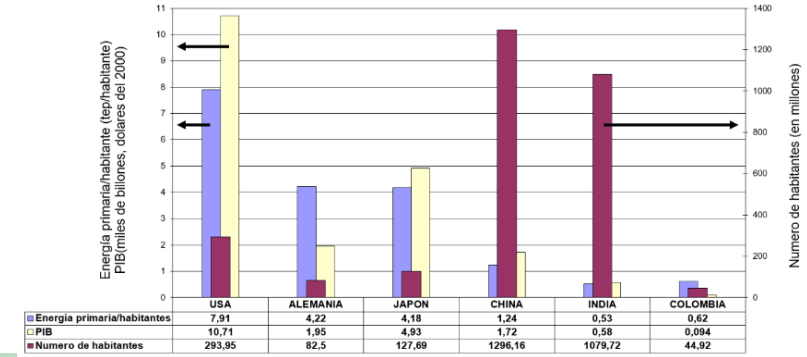
Transiciones energéticas ocurridas

Fuente: *Roger Fouquet. "Historical energy transitions: Speed, prices and system transformation" Energy Research & Social Science 22 (2016) 7–12*

Fuente de energía	Energía/masa [Btu/Lb]	Densidad de área [Btu/Hectárea]
Petróleo	20,000	20-200 ($x10^9$)
Gas Natural	24,000	20-200 ($x10^9$)
Carbón	800-13000	20-200($x10^9$)
Uranio	150 ($x10^9$)	2 ($x10^{12}$)
Madera	8000 seca	2-10 ($x10^9$)
Energía Solar	---	2-10 ($x10^6$)
Hidroituango	---	2 ($x10^6$)

Densidad de energía

Adaptada de: *Doug Reynolds. "Entropy subsidies". Energy Policy, Vol. 26, No. 2, pp. 113-118, 1998*

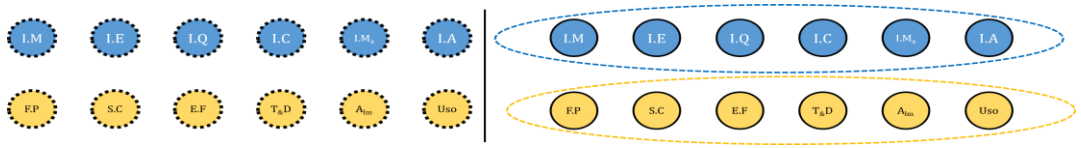


Consumo específico, crecimiento económico y población

Tomado de: *IEA-Intenational Energy Agency*

2. Vacíos en la enseñanza de la energía en la ingeniería

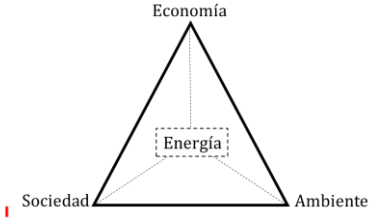
- El abordaje del concepto de energía y de los sistemas energéticos, se ha realizado en compartimientos aislados, ha faltado una aproximación sistémica.



- Ha habido una apropiación parcial de los paradigmas científicos o “ciencia normal” de la energía.

¿Combustión? ¿Electroquímica? ¿Turbulencia? ¿Materiales/Energía?

- Las interacciones de los sistemas energéticos con la sociedad y la economía no ha sido abordas lo suficientemente.



- No se presentan reflexiones acerca del desarrollo histórico de los sistemas energético del país.

Hitos Fracasos Corrupción Disponibilidad Confiabilidad Institucionalidad Sostenibilidad Impactos Modelos P.

- Enseñanza de conceptos y leyes sin ilustración o contextualización alrededor de los problemas reales .

Química Calores de reacción Contenido energético

- Tardía aproximación a conceptos y sistemas energéticos , no se aprovecha para hacerlo tempranamente desde la enseñanza de las ciencias básicas.

Ec. Maxwell Ind. Electromagnética Generación Eléctrica Ley Gases Ideales Densidad gases (P,T) Perd. Potencia ST

- La investigación no ha tenido un impacto significativo en la innovación y la transferencia tecnológica al sector productivo y en consecuencia al desarrollo tecnológico industrial.

Est. Fenomenología Prob. Tecnológico Escalamiento Oper. Condiciones reales

- Apropiación lenta de las herramientas modernas para el análisis, diseño, optimización y gestión de los sistemas energéticos: brecha tecnológica digital, por ejemplo.

3. La ingeniería ante los retos energéticos: Tendencias Globales

- La descarbonización y la Transición Energética.
- Objetivo 7 de Desarrollo Sostenible: Duplicar la eficiencia energética e incrementar la penetración de las energías renovables.
- El Trilema Energético: Sostenibilidad, Seguridad Energética y Acceso a la Energía.

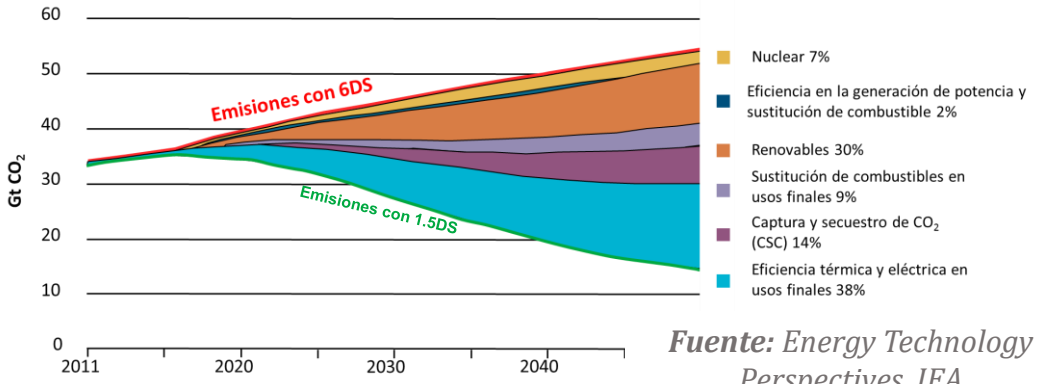
NACIONES UNIDAS

OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE

7 ENERGÍA ASEQUIBLE Y NO CONTAMINANTE

International Energy Agency Secure Sustainable Together

ODS 7	Garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna para todos
Meta 7.1.	De aquí a 2030, garantizar el acceso universal a servicios energéticos asequibles, fiables y modernos
Meta 7.2.	De aquí a 2030, aumentar considerablemente la proporción de energía renovable en el conjunto de fuentes energéticas
Meta 7.3.	De aquí a 2030, duplicar la tasa mundial de mejora de la eficiencia energética
Meta 7.a	De aquí a 2030, aumentar la cooperación internacional para facilitar el acceso a la investigación y la tecnología relativas a la energía limpia.
Meta 7.b	De aquí a 2030, ampliar la infraestructura y mejorar la tecnología para prestar servicios energéticos modernos y sostenibles para todos.



Fuente: *Energy Technology Perspectives. IEA*

Fuente: *World Energy Trilemma Index 2018. WEC.*

3. La ingeniería ante los retos energéticos: Tendencias globales

- Nuevos paradigmas científicos para el estudio y desarrollo tecnológico en los sistemas energéticos.
- En búsqueda de los limites físicos y termodinámicos: hacia equipos super-eficientes e inteligentes.
- La irrupción de gran número de innovaciones tecnológicas radicales e incrementales en las cadena de valor de los sistemas energéticos:
  - Según "*Energy Technology Perspectives 2024 – Analysis – IEA*" se encuentran en diferentes fases de desarrollo y penetración comercial, 600 tecnologías.
  - Las temáticas de mayor penetración están relacionadas con:

○ Energía renovable	○ Transporte vehicular y marítimo	○ Calor renovable.	○ Hidrógeno y otros gases renovables.
○ Almacenamiento	○ Electrificación de procesos	○ Combustión sostenible.	○ Power to X.
○ Inteligencia Artificial		○ Técnicas de absorción y separación de moléculas.	

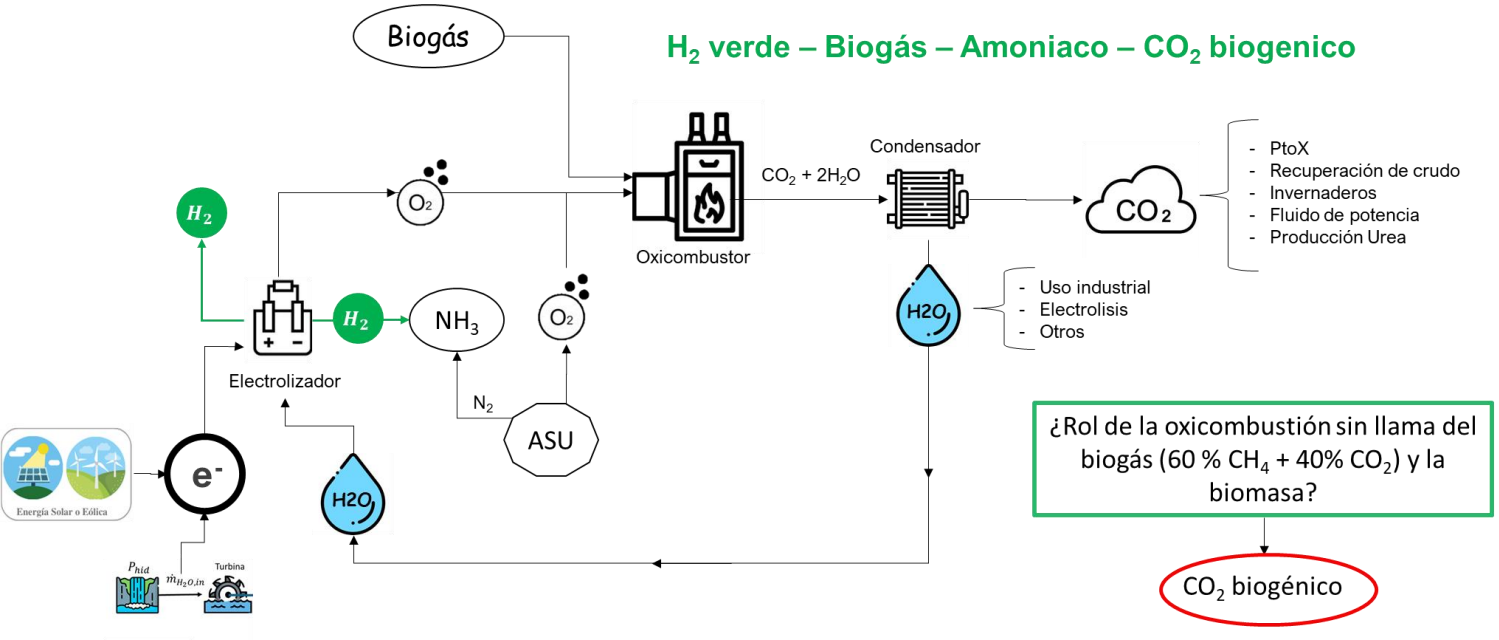
  - Las tecnologías de mayor penetración e impacto :

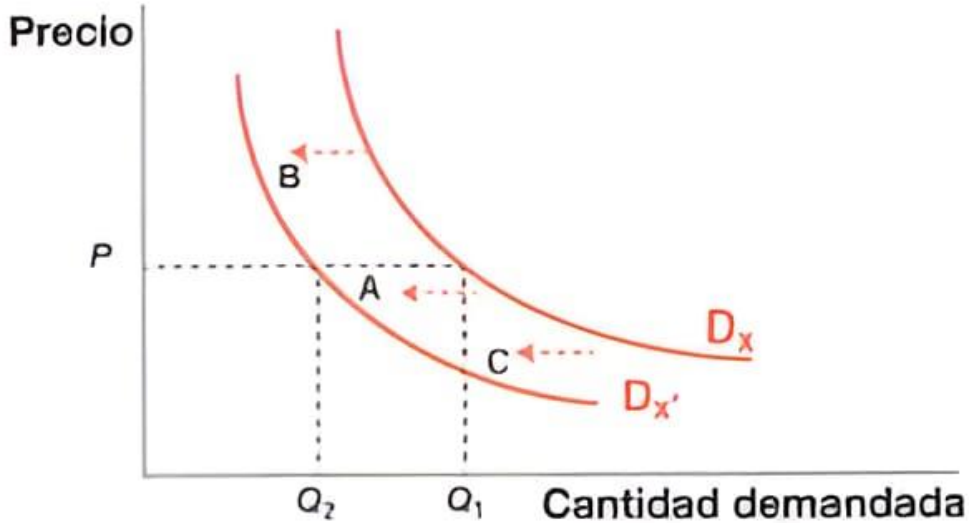
○ Paneles solares PV.	○ Baterías.	○ Electrolizadores.	○ Captura de CO_2.
○ Turbina eólica.	○ Bombas de calor .	○ Vehículos eléctricos.	

- La IA y ML y su aplicación el estudio, desarrollo y optimización de los sistemas energéticos.
- La geopolítica de la energía y su impacto sobre las metas de descarbonización y trayectorias de innovación tecnológica.
- Los sistemas energéticos y su interacción con los territorios, comunidades y la democratización en sus beneficios.

3. La ingeniería ante los retos energéticos: Tendencias globales

- Sistemas energéticos distribuidos, descentralizados, desescalarizados y con economía circular.
- Hacia sistemas de transformación energética complementarios, flexibles y con circularidad.
- Electrificación de la economía versus complementariedad con combustibles convencionales en una nueva dimensión y combustibles renovables. Condiciones: ER + IT&D + Alm + E uso final + interconexiones regionales + sostenibilidad+ costos bajos electricidad.



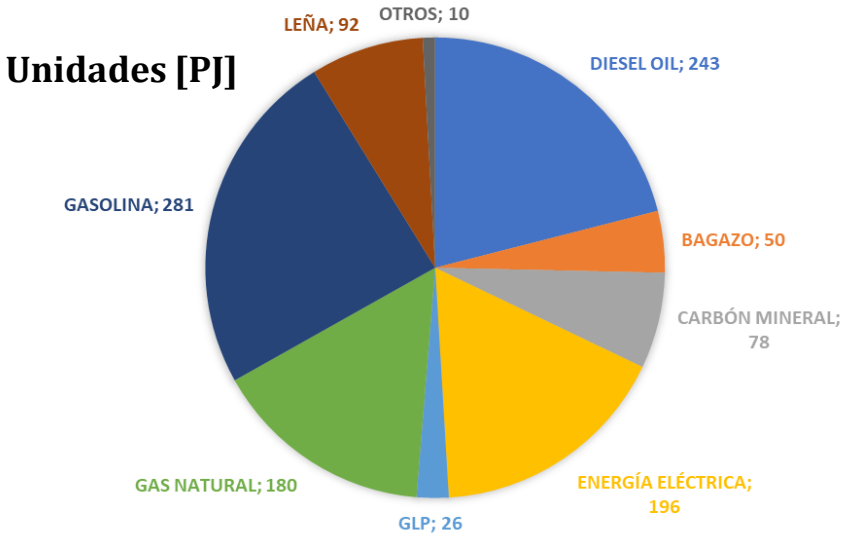


Es posible que en pequeña y mediana escala con arreglos innovativos, economía circular y sinergia, se puedan lograr sistema de transformación energética tan eficientes y de costos comprables a los que se obtienen en la gran escala.

3. La ingeniería ante los retos energéticos: Tendencias nacionales

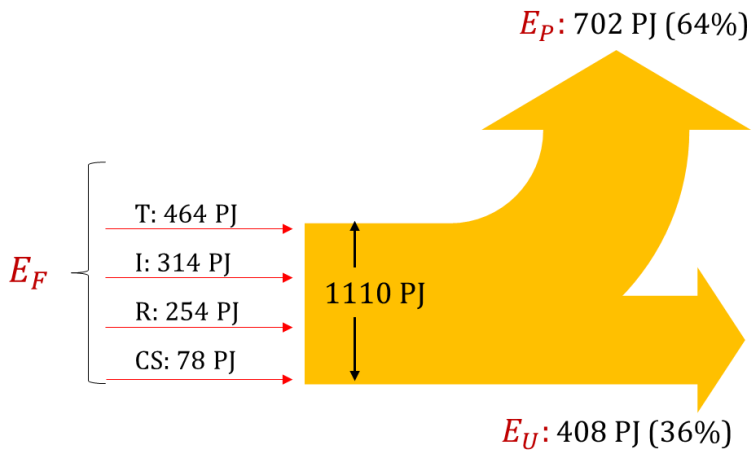
- Abordar la descarbonización y la TE en sus justas dimensiones, atendiendo la particularidades nacionales y con soporte científico.
- Colombia es energéticamente ineficiente, incrementar la eficiencia energética en toda la cadena de valor de los sistemas es urgente y prioritario.

Matriz de energía final

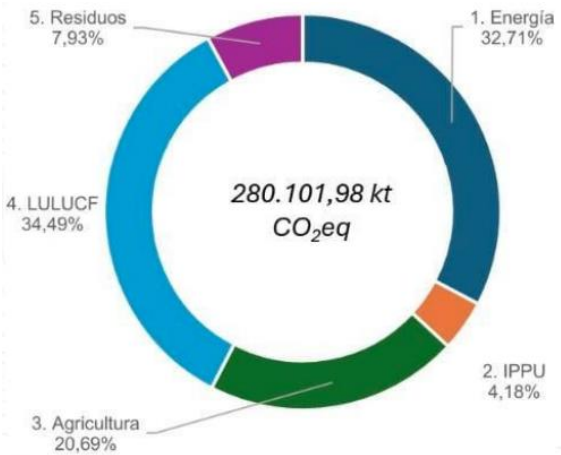


Fuente: Elaboración Propia, adaptado de BECO, UPME.

Eficiencia energética nacional



Emisiones por fuente



LULUCF: Uso del suelo y deforestación
IPPU: Procesos industriales.

Fuente: Inventario nacional de emisiones y absorciones atmosféricas de Colombia: GEI contaminantes, criterio y carbono negro. IDEAM, 2024

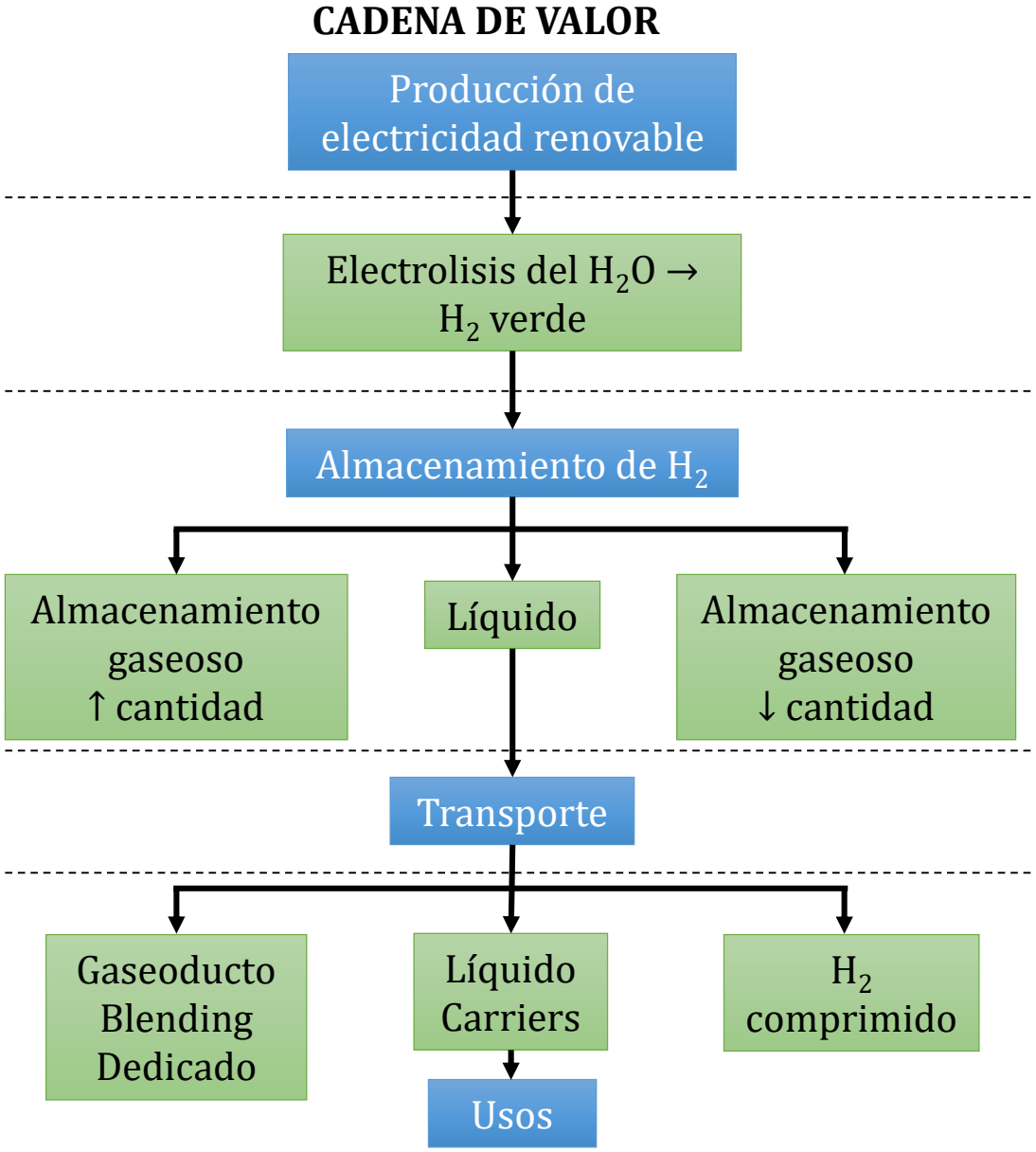
3. La ingeniería ante los retos energéticos: Tendencias nacionales

- Las políticas publicas, I+D+i y la enseñanza de la energía deben tener como criterios de referencia: Sostenibilidad, Seguridad Energética y Acceso a la Energía.
- Entre la investigación y el desarrollo tecnológico se deben reducir los tiempos, ser paralelo siempre que sea posible, no solo en la microescala de laboratorio, si no en la escala y condiciones de los procesos reales preferiblemente.
- La IA y ML y su ampliación en los sistemas energéticos. modelos físico-matemáticos, diseño y optimización.
- Perspectivas, condiciones y alcances de la electrificación de la economía, dependiendo de recursos, infraestructura, tecnologías de uso final y costos.
- La geopolítica de la energía y su impacto sobre las metas de descarbonización y trayectorias de innovación tecnológica.
- Los sistemas energéticos y su interacción con los territorios, comunidades y la democratización en sus beneficios.

3. La ingeniería ante los retos energéticos: Tendencias nacionales

- En sus regiones, las facultades de ingeniería deben diseñar agendas para observar, examinar y contribuir en la formulación de políticas publicas en relación con los sistemas energéticos y su interacción con los territorios.
- Abordar las interacciones entre sistemas energéticos y biodiversidad (protección, conservación y usos sostenibles), tanto en la enseñanza y como la I+D+i, es un imperativo nacional y retos para FI.
- Renovar el rol y en consecuencia activar nuevas oferta en la enseñanza y la I+D+i, en relación con los potenciales del subsuelo y su interacción de los sistemas energéticos.
- Las políticas publicas, I+D+i y la enseñanza de la energía deben tener como criterios de referencia: Sostenibilidad, Seguridad Energética, Eficiencia Energética y Acceso a la Energía.
- La disponibilidad de herramientas de IA, la sensórica, la transmisión y analítica de datos, permite nuevas intervenciones en tiempo real con el entorno: biodiversidad, stock físico, procesos productivos y de transporte.
- Asimilar y aplicar estándares internacionales de evaluaciones y homologación de tecnologías de conversión energética en transporte (*World Harmonized Light-duty Test Porcedure – WLTP y Real Driving Emissions Test – RDE*).
- Asimilar y aplicar estándares internacionales de evaluaciones y homologación para equipos electroquímicos como electrolizadores y celdas de combustible.

3. La ingeniería ante los retos energéticos: Requerimientos de I+D+i para H_2 y sistemas PtX



REQUERIMIENTOS EN CTI

- Evaluación más precisa de potenciales.
- Sincronización fuentes y planta de electrolisis.

- Fundamentos y estado de la técnica en electrolisis.
- Ingeniería de las plantas de electrolisis.
- Incidencia de condiciones atmosféricas.

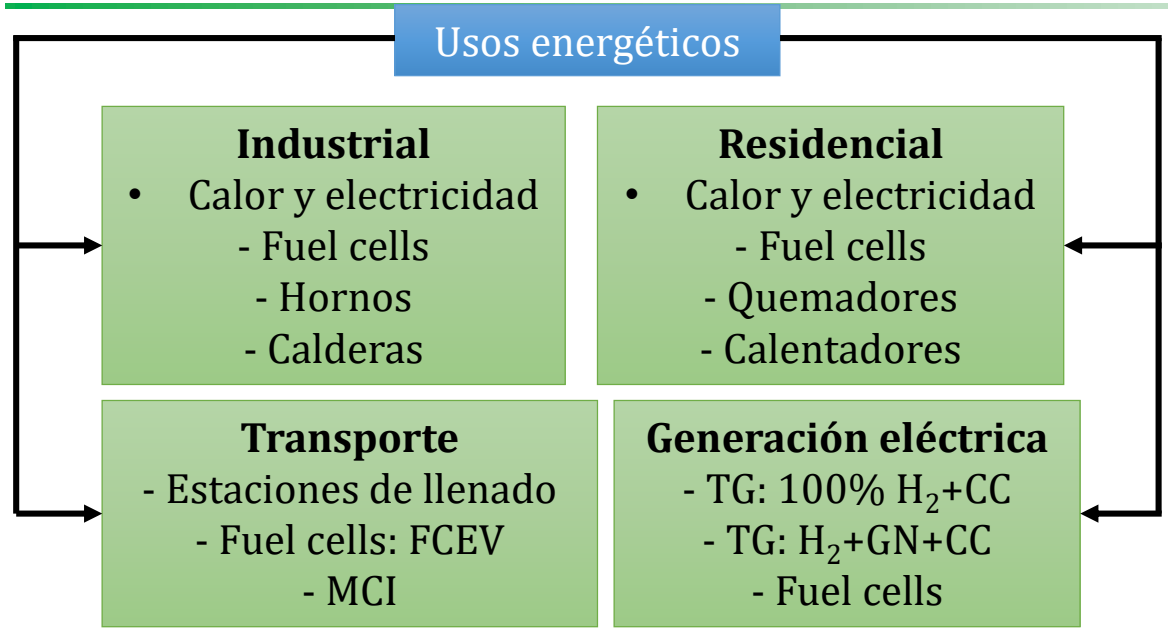
- Identificación y caracterización cavidades salinas.
- Ingeniería de almacenamiento: líquido y gaseoso.
- Identificación y adaptación de la normatividad vigente.

- Ingeniería y tendencias tecnológicas en blending y redes.
- Ingeniería y tendencias tecnológicas en infraestructura dedicada.

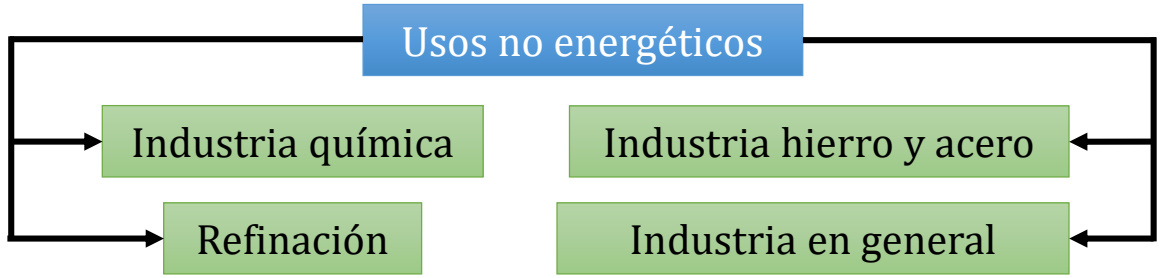
- Fundamentos termoquímicos, catalíticos y electroquímicos para transformación y carriers.
- Ingeniería y tendencias tecnológicas en transformación y carriers.
- Técnicas de separación H_2/CH_4.

Fuente: *Taller científico: Hidrógeno de bajo carbono. Organizado por la Embajada de Francesa, MinCiencias y Ecopetrol.* ***Andrés Amell Arrieta, Bogotá, diciembre 2021.***
https://youtube.com/clip/Ugkxspm2UAB0YeN9XtrE2nS3vU6jlEKVWeLu?si=nDHYrHIwQ-NxLDXq

3. La ingeniería ante los retos energéticos: Requerimientos de I+D+I y cadena de valor del H_2 verde



- Ingeniería de ciclo combinado con H_2, H_2/GN.
- Fundamentos de la electroquímica en celdas de combustible.
- Ingeniería y tendencias tecnológicas en celdas de combustible.
- Combustión avanzada del H_2.
- Combustión avanzada de la mezcla H_2/GN, H_2/GLP y H_2/otros.
- Impactos ambientales y emisiones contaminantes.
- Normativa para el uso seguro en todos los sectores.



- Transformación termoquímica.
- Transformación catalítica.
- Combustión avanzada del H_2.
- Ingeniería de las transformaciones T, C y EQ.

Power to X

- Electrolisis.
- Transformación termoquímica.
- Transformación catalítica.
- Técnicas de separación.
- Licuefacción.
- Almacenamiento.

Fuente: *Taller científico: Hidrógeno de bajo carbono. Organizado por la Embajada de Francesa, MinCiencias y Ecopetrol.* ***Andrés Amell Arrieta, Bogotá, diciembre 2021.***
https://youtube.com/clip/Ugkxspm2UAB0YeN9XtrE2nS3vU6jlEKVWeLu?si=nDHYrHIwQ-NxLDXq

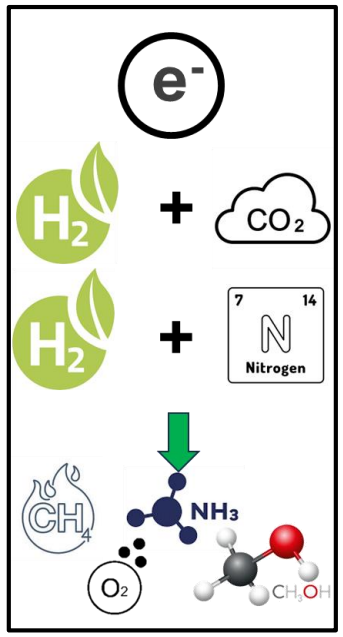
3. La ingeniería ante los retos energéticos: Sistemas Power to X

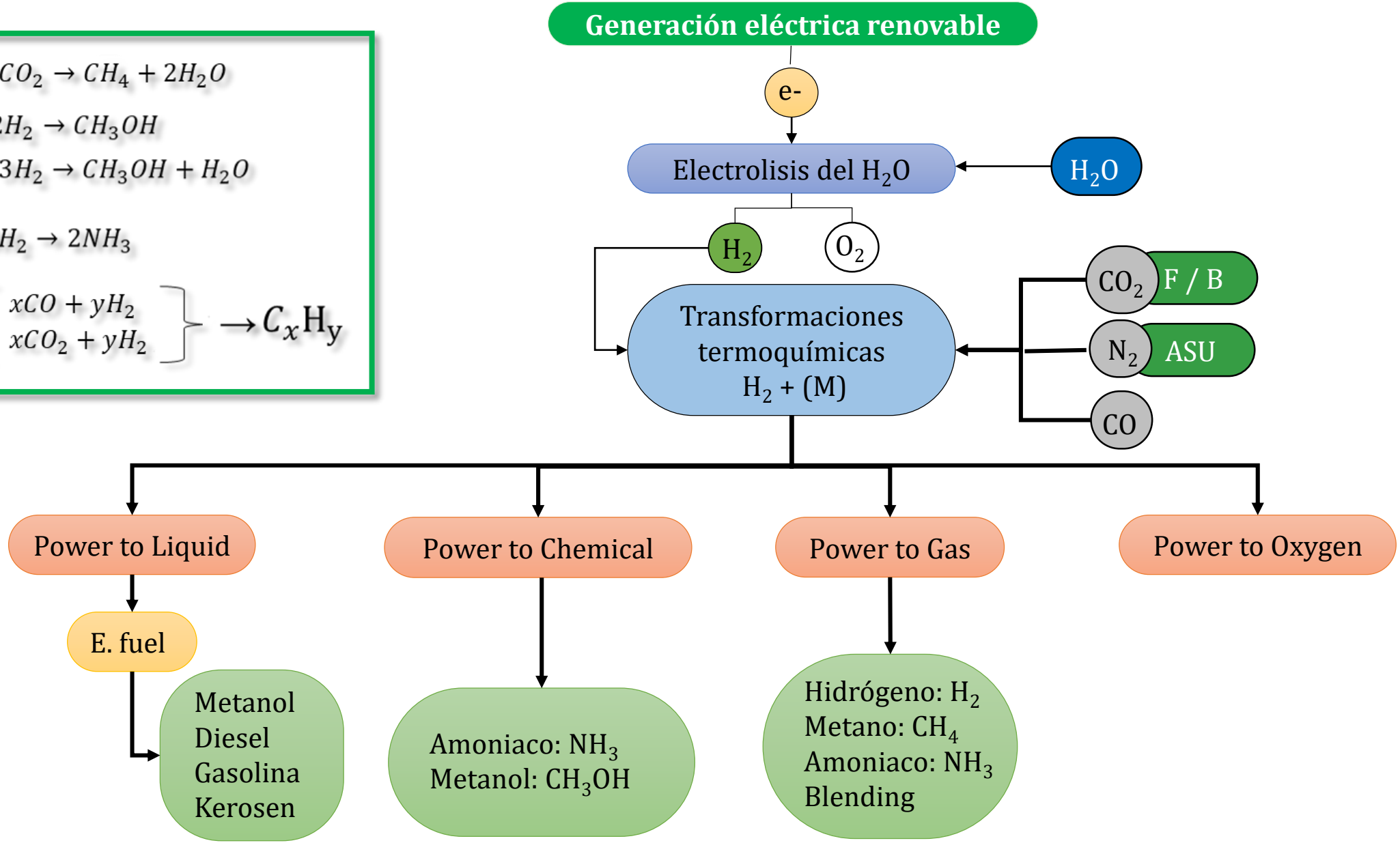
Metano: $4H_2 + CO_2 \rightarrow CH_4 + 2H_2O$

Metanol:
$CO + 2H_2 \rightarrow CH_3OH$
$CO_2 + 3H_2 \rightarrow CH_3OH + H_2O$

Amoniaco: $N_2 + 3H_2 \rightarrow 2NH_3$

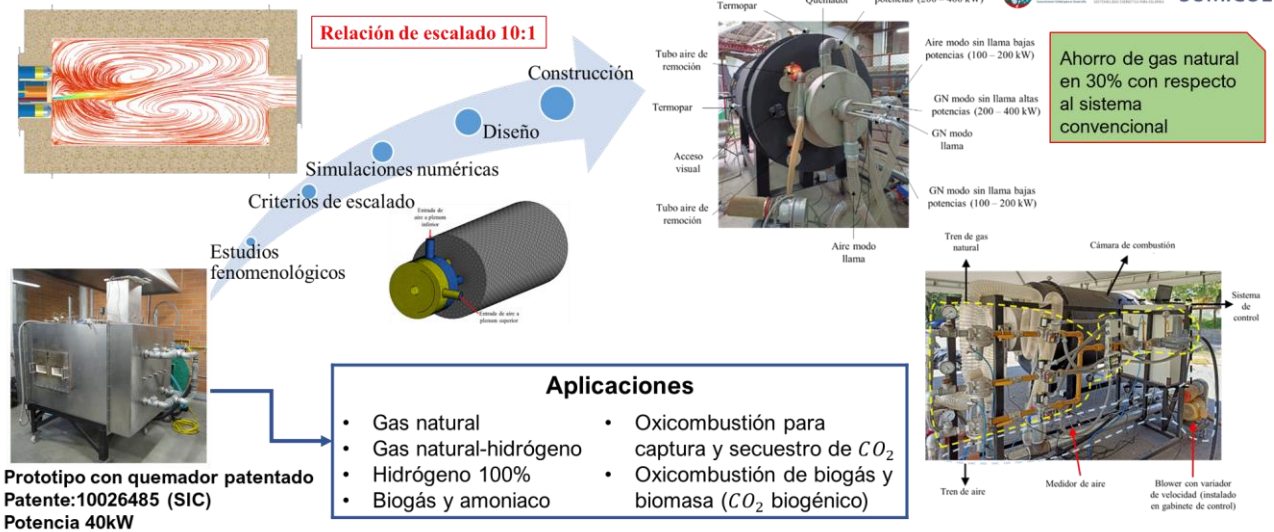
Hidrocarburos: $\left\{ \begin{matrix} xCO + yH_2 \\ xCO_2 + yH_2 \end{matrix} \right\} \rightarrow C_xH_y$



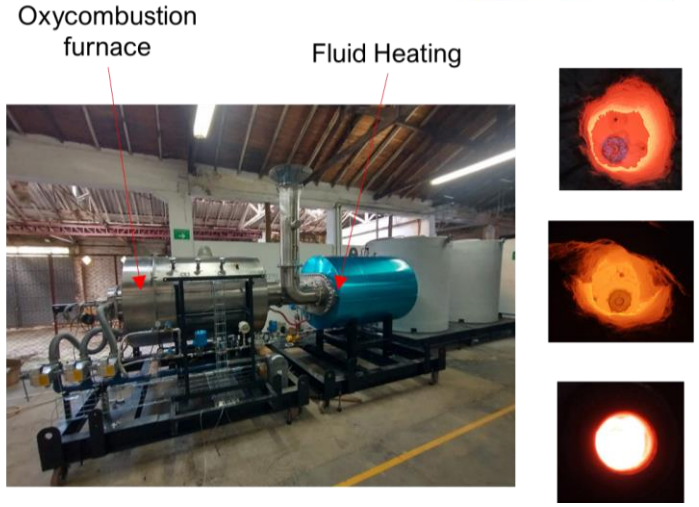


3. La ingeniería ante los retos energéticos: Algunas casos de éxito grupo GASURE

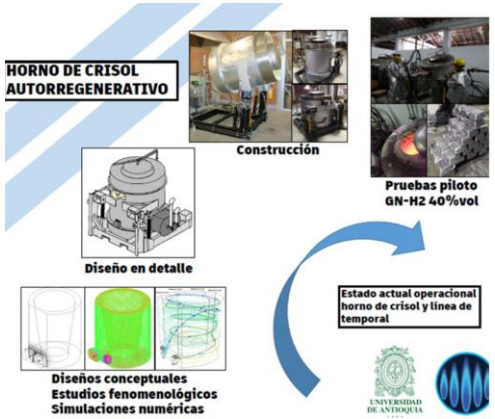
Transferencia tecnológica de la combustión sin llama aire normal al proceso de secado de arcillas de Sumicol S.A.S

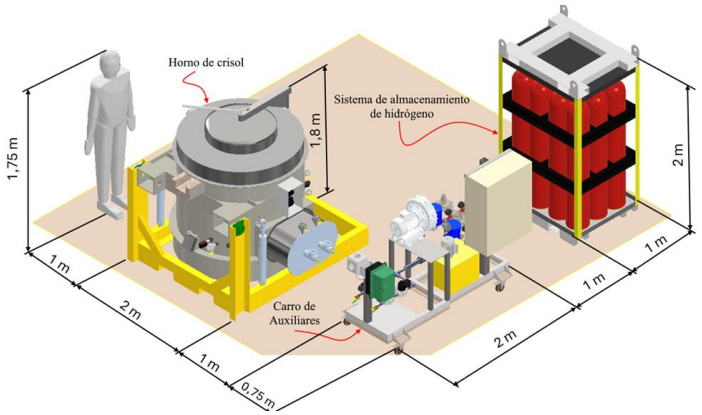


Planta Piloto de Oxicombustión sin Llama

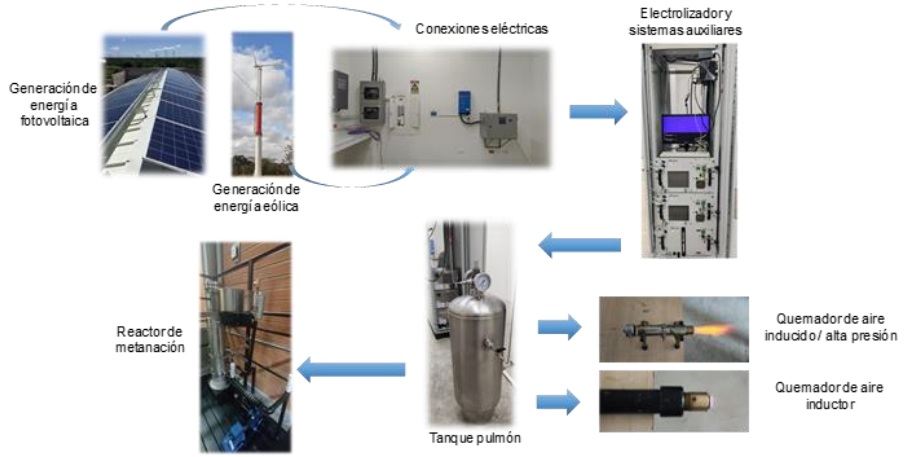


Planta Piloto de producción de Aluminio verde



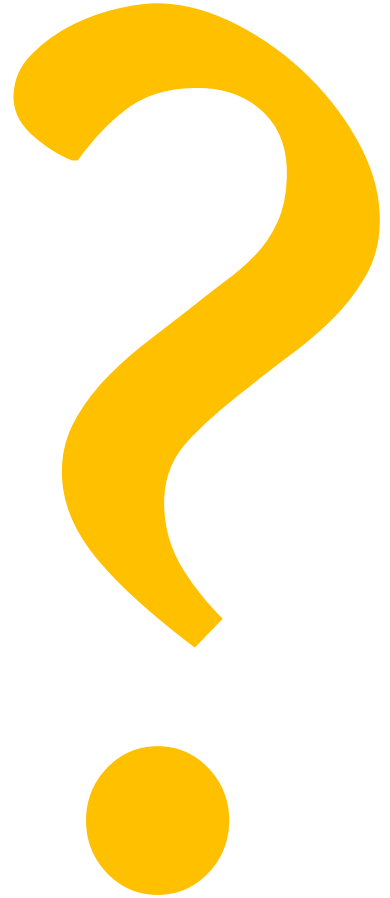


Planta Piloto de Power to Gas



3. La ingeniería ante los retos energéticos: Interrogantes

- ¿Consolidará Colombia capacidades científicas y tecnológicas para dar soporte a la transición energética?
- ¿La transición energética en Colombia consolidará una sociedad mas equitativa y un desarrollo regional más armónico y sin asimetrías?
- ¿Cómo se transformaría la matriz energética colombiana?
- ¿Cuáles serían las características y alcances de las complementariedades entre fuentes de energía?
- ¿Cuáles serías los nuevos encadenamientos industriales a partir de los nuevos recursos energéticos?
- ¿Cuál sería la estructura de los usos finales de la energía en los diferentes sectores de la sociedad?
- ¿Ocurrirá un traslado del centro de gravedad en el suministro de energía actual hacia otras regiones? ¿Guajira y el Caribe nueva despensa energética en Colombia?
- ¿Cuál será el rol de los energéticos colombianos costa afuera?
- ¿Será la Amazonía colombiana vulnerable ante las nuevas necesidades de recursos energéticos para sustentar la transición?
- ¿Podrá Colombia garantizar altos índices de conservación de biodiversidad en el nuevo contexto de la transición energética?



GRACIAS POR SU ATENCIÓN

Andrés Adolfo Amell Arrieta

andres.amell@udea.edu.co

Coordinador del grupo GASURE, docente e investigador UdeA

http://gasure.udea.edu.co/

Facultad de Ingeniería Mecánica

Universidad de Antioquia

Envigado, marzo 20/2025

UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA

Facultad de Ingeniería

GASURE

Grupo de Ciencia y Tecnología del Gas y Uso Racional de la Energía