

Estudio prospectivo de mercado laboral en la cadena de hidrógeno verde y derivados en Uruguay

Impactos en empleo, perfiles ocupacionales y formación profesional al 2024.



Director Nacional de Empleo
Federico Araya

Autores:
Martín Lavalleja y Santiago Mullín

Coordinación: División Formación Profesional
Mauricio Vidal Vitello (DINAE - MTSS) Mariana Ferrer, Pilar Dos Santos (UETSS - MTSS)

Socios colaboradores: Ministerio de Industria, Energía y Minería
Damián Pirrocco y Gastón Ellis

Por favor citar esta publicación como a continuación:
Ministerio de Trabajo y Seguridad Social – Dirección Nacional de Empleo. (2025). *Estudio prospectivo de mercado laboral en la cadena de hidrógeno verde y derivados en Uruguay: Impacto en empleo, perfiles ocupacionales y formación profesional al 2024*. MTSS-DINAE.



**Ministerio de Trabajo
y Seguridad Social**

**Dirección Nacional
de Empleo**



**Ministerio de Industria,
Energía y Minería**

Índice

Resumen Ejecutivo.....	3
Introducción.....	5
1. Cadena de valor de H2V.....	6
2. Estructura productiva.....	11
Introducción a la Infraestructura de EERR.....	19
3. Impacto en demanda de mano de obra.....	28
Metodología de Cálculo Preliminar.....	29
Resultados Preliminares: Empleo Directo en Construcción (CAPEX).....	29
Resultados: Empleo Directo en Operación y Mantenimiento (O&M).....	30
4. Descripción de perfiles ocupacionales por componente tecnológico.....	32
Perfiles Ocupacionales Para Construcción De EERR (Eólica Onshore Y Solar Fotovoltaica).....	32
Perfiles para Operación y Mantenimiento (O&M) de Plantas de Electrólisis.....	55
Plantas de e-Metanol.....	61
Perfiles Ocupacionales Para Construcción Y Operación De Planta e-NH3/UREA.....	72
Perfiles Ocupacionales para Construcción Y Operación De Plantas de Captura de CO2 (En Plantas De Celulosa).....	76
5. Estructura ocupacional, habilidades clave y vinculación con la formación profesional.....	91
6. Recomendaciones de políticas activas de empleo y formación profesional.....	101
Referencias bibliográficas.....	110
Anexo 1. Metodología, enfoque y estimación de factores de empleo.....	112
I. Estimación de factores de empleo por tipo de proyecto.....	115
Anexo 2. Hoja de Ruta para el Desarrollo del Capital Humano: Prioridades por Fases.....	145

Resumen Ejecutivo

El presente informe desarrolla un estudio prospectivo sobre el impacto que tendrá el desarrollo de la cadena del hidrógeno verde y derivados (H₂VyD) en el mercado laboral uruguayo al año 2040. Enmarcado en los objetivos establecidos en la Hoja de Ruta del Hidrógeno Verde de Uruguay, el análisis se centra en identificar las necesidades de empleo, los perfiles ocupacionales requeridos y las implicancias en términos de formación profesional derivadas de la implementación de este nuevo vector energético.

Uruguay presenta condiciones excepcionales para el desarrollo del H₂VyD: una matriz energética casi completamente renovable, abundantes recursos eólicos y solares, y disponibilidad de agua y CO₂ biogénico. Estos elementos lo posicionan como un potencial productor y exportador relevante de hidrógeno verde y productos derivados como metanol, amoníaco, urea y combustibles sintéticos (e-fuels).

La estrategia nacional prevé alcanzar una producción de 1 Mtpa (millón de toneladas anuales) de H₂V al 2040, lo que implica instalar 9 GW de capacidad de electrólisis y al menos 18.9 GW de nueva capacidad de energías renovables, principalmente eólica y solar.

El análisis se construye sobre un escenario base que plantea una estructura centralizada de producción. En este escenario, se contempla la instalación de:

- Plantas de producción de H₂V mediante electrólisis (principalmente en el Noroeste).
- Plantas de conversión en derivados: e-metanol (Durazno y Paysandú), e-SAF (Montevideo) y urea (Durazno).
- Infraestructura logística: hidroductos para transportar H₂, ductos para CO₂, red eléctrica para procesos downstream y transporte ferroviario para productos finales.

En total, se estima una producción de 973 ktpa (Miles de toneladas por años) de H₂V: 863 ktpa para derivados y 110 ktpa para abastecer el transporte de carga pesada mediante producción distribuida.

Por otra parte, se estima que la implementación del escenario proyectado generaría una importante demanda de empleo, tanto en la etapa de construcción (CAPEX) como en operación y mantenimiento (O&M):

- **Construcción (CAPEX):** Se estiman aproximadamente **48.400** empleos directos totales para el período 2026-2040, lo que implica más de 3.200 empleos al año. Los principales impulsores son la construcción de infraestructura de generación renovable, plantas de electrólisis e infraestructura habilitante.
- **Operación (O&M):** Se proyectan **3.100 empleos directos estables** hacia 2040. La mayoría se concentra en la operación de plantas de electrólisis, e-Metanol, e-SAF y Urea, así como en las actividades de mantenimiento de infraestructura energética y logística.

El estudio identifica y describe los perfiles ocupacionales necesarios por componente tecnológico, tanto en construcción como en operación:

- **Para energías renovables:** técnicos en montaje y mantenimiento de parques eólicos y solares, operadores de subestaciones, instaladores eléctricos y supervisores de obra.
- **Para electrólisis y síntesis química:** operadores de plantas, técnicos en automatización y control, ingenieros químicos, especialistas en seguridad de procesos y mantenimiento industrial.
- **Para captura y transporte de CO₂:** operadores de controladores de potencia de planta, ingenieros ambientales, técnicos en redes de ductos y sistemas de medición certificada.
- **Para logística:** operadores ferroviarios, encargados de terminales logísticas y técnicos en transporte de materiales peligrosos.

A su vez, se detectan importantes desafíos en la adecuación del sistema de formación profesional y técnica a las nuevas demandas del sector:

- Falta de oferta formativa específica para perfiles vinculados a la electrólisis, captura de CO₂ y síntesis química de derivados.
- Baja incorporación de habilidades transversales como seguridad industrial, digitalización y gestión ambiental.
- Necesidad de actualización de programas técnicos existentes en áreas de energía, química y logística.

Se proponen un conjunto de medidas para anticiparse a las necesidades de capital humano del sector:

- **Diseño de rutas formativas específicas** por componente tecnológico, articuladas entre UTU, universidades, Inefop, empresas y centros de I+D.
- **Creación de un programa nacional de certificación** de competencias técnicas para tecnologías emergentes.
- **Inversión en capacidades docentes** y actualización de infraestructura educativa.
- **Fomento de la participación de mujeres y jóvenes** mediante acciones afirmativas y visibilización de oportunidades.
- **Desarrollo de un programa de transición justa** para trabajadores de sectores en declive que puedan reconvertirse al sector del H₂VyD.

En conclusión, el desarrollo del H₂VyD en Uruguay tiene el potencial de convertirse en un nuevo motor de crecimiento económico, exportaciones y empleo calificado, apalancado en las ventajas comparativas del país en energías renovables. La cadena de valor proyectada no solo permite avanzar en los compromisos de descarbonización, sino que también genera un impacto positivo en la matriz productiva y laboral nacional.

La implementación exitosa del escenario analizado depende de inversiones estratégicas, planificación territorial, desarrollo de infraestructura habilitante y, de una política activa de formación y reconversión del capital humano.

El diseño temprano de una hoja de ruta para el desarrollo del talento permitirá maximizar los beneficios sociales y económicos del H₂VyD, consolidando a Uruguay como un referente regional en la transición energética.

Introducción

El desarrollo del hidrógeno verde y sus derivados (H₂VyD) ha emergido como una de las principales estrategias de descarbonización a nivel global. Con el avance de las energías renovables y la creciente necesidad de reducir emisiones en sectores industriales y del transporte, el H₂VyD se posiciona como un vector energético clave para la transición hacia economías bajas en carbono. Uruguay, con su matriz energética predominantemente renovable y su potencial para la generación de H₂V, ha identificado una oportunidad estratégica en este sector, estableciendo el objetivo de alcanzar 1 millón de toneladas por año (Mtpa) de producción de H₂V al 2040, en línea con su Hoja de Ruta del Hidrógeno Verde¹.

El hidrógeno producido a partir de agua y energías renovables, y con capacidad de descarbonizar distintos usos (transporte, energía térmica, energía industrial, materias primas y estabilización de redes eléctricas altamente renovables), se ha posicionado como una materia prima de gran relevancia en la agenda global. En especial, para aquellos sectores donde la descarbonización a través de energía eléctrica es muy compleja.

En este sentido, el H₂V se muestra como un paso natural en el proceso de descarbonización del sector energético en Uruguay, luego de la significativa reducción en el uso de fósiles en nuestra matriz eléctrica, debido a sus ventajas competitivas para ser un productor relevante de H₂VyD, tanto para el mercado local como para la exportación.

Por otra parte, el país tiene un gran potencial para generar energía renovable, principalmente eólica y solar, dado que cuenta con un buen recurso combinado de viento y sol en varias regiones, lo que permitiría obtener buenos factores de capacidad en el electrolizador y costos competitivos de producción de hidrógeno. Las regiones del norte y noroeste del país presentan las mejores características para la generación de energía solar, mientras que las regiones del sur y centro presentan recursos de calidad media. Para la energía eólica, las áreas de alta calidad se encuentran en el límite entre los departamentos de Rivera, Tacuarembó y Salto, y entre Lavalleja, Florida y Treinta y Tres (Uruguay XXI, 2023).

Adicionalmente, Uruguay presenta una buena disponibilidad de recurso hídrico, aspecto clave para la producción de H₂VyD en base a electrólisis. A su vez, cuenta con disponibilidad de CO₂ biogénico, que es el dióxido de carbono producido por la descomposición de la biomasa. Este CO₂ puede ser usado en la producción de derivados del hidrógeno a través de procesos como la fotosíntesis artificial o la hidrogenación, entre otros procesos. Se estima que en 2024, Uruguay emitió aproximadamente 11 millones de toneladas de CO₂ biogénico que podrían utilizarse para la producción de derivados del hidrógeno. Estas emisiones se producen principalmente en instalaciones industriales que utilizan biomasa para generar energía, como plantas de producción de pulpa de celulosa y plantas de menor escala de producción de energía. Es importante destacar, que Uruguay puede tener acceso a otras fuentes de biomasa residual, que aún no se encuentran en uso, como ser la cáscara de arroz y otras fuentes de origen agrícola.

¹ Ver en: <https://www.gub.uy/ministerio-industria-energia-mineria/comunicacion/noticias/hoja-ruta-hidrogeno-verde-uruguay-0>

Actualmente, existen en el país cinco proyectos de hidrógeno verde² con distintas características y escalas, que se encuentran en diferentes etapas: Tambor Green Hydrogen Hub, HIF Global, H24U, Kahiros y Alfanar. El desarrollo de estos proyectos se encuentra en algunos casos en etapas iniciales, dependiendo su concreción de diversos factores: fuentes de financiamiento, habilitaciones ambientales, precios internacionales del H₂VyD, demanda efectiva, infraestructura habilitante, precios de compra/venta de energía eléctrica a UTE, entre otros.

En lo relativo a los riesgos³, debemos destacar que uno de los principales desafíos a los que se enfrenta el sector del hidrógeno verde es el financiamiento de los proyectos. Sus altos costos de producción, tecnologías que recién comienzan a desarrollarse en algunos casos, falta de regulación específica y el desarrollo del mercado, son algunas de las barreras o desafíos que actualmente ponen un freno en el impulso de esta industria.

En lo relativo a la demanda de empleo y formación profesional, un enfoque temprano en el desarrollo de habilidades podría ayudar a crear oportunidades y evitar futuros cuellos de botella en los recursos humanos a medida que la industria se desarrolla (IEA, 2021).

En este sentido, en este trabajo se realiza una investigación prospectiva con el objetivo de anticipar las necesidades de empleo y formación profesional derivadas de la implementación de la hoja de ruta del hidrógeno verde y derivados⁴ en Uruguay. En el siguiente apartado, se describe la cadena de valor del hidrógeno verde. A continuación, se define la estructura productiva en función de los objetivos productivos definidos en la hoja de ruta. En el apartado 3, se estima la demanda de empleo. En el apartado siguiente, se describen los perfiles ocupacionales por componente tecnológico. En el apartado 5, se presenta la estructura ocupacional, las habilidades clave y su vinculación con la formación profesional. Por último, se presentan las principales conclusiones y recomendaciones de políticas activas de empleo y formación profesional.

1. Cadena de valor de H₂V

El hidrógeno verde es considerado un vector energético clave en la transición hacia un modelo de producción sostenible y libre de emisiones de carbono. A medida que los países buscan reducir sus emisiones y avanzar en la descarbonización de sectores clave, la producción y uso del H₂V han cobrado una relevancia creciente.

La cadena de valor del H₂V abarca una red de procesos interconectados, desde la generación de energía renovable hasta el uso final del hidrógeno y sus derivados en industrias clave como transporte, generación de energía, producción química y fertilizantes. Cada eslabón de esta cadena no solo representa oportunidades tecnológicas, sino también puede tener impactos económicos y sociales positivos significativos. La inversión en H₂V y su cadena de valor, promueve la generación de

2 <https://www.gub.uy/ministerio-industria-energia-mineria/politicas-y-gestion/proyectos-hidrogeno-verde-derivados-uruguay>

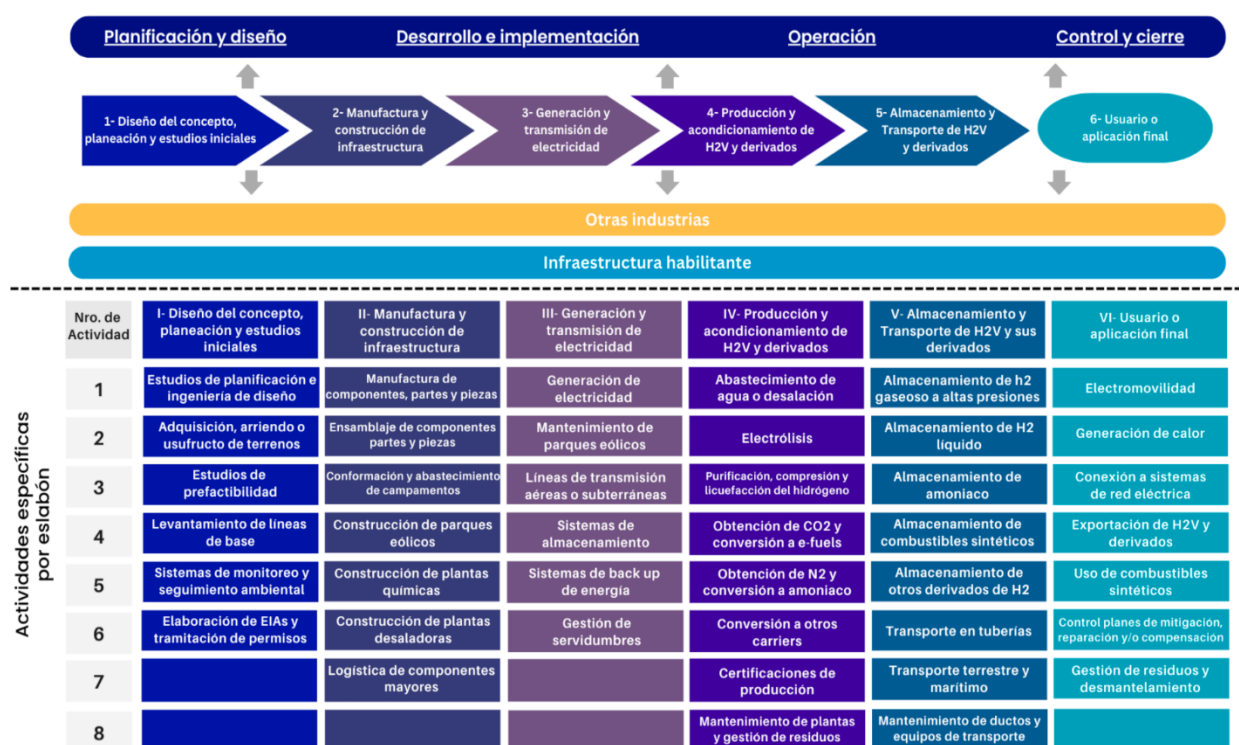
3 No se consideran los de origen técnico en la producción de H₂V y derivados, sino los inherentes al desarrollo e implementación de los proyectos.

4 Se consideran como derivados aquellas materias primas o feedstocks incluidos dentro de los escenarios proyectados en la Hoja de Ruta del H₂V en Uruguay, como ser: e-fuels y amoníaco. No se consideran otras posibles aplicaciones que no hayan sido expresamente consideradas en la HdR, como ser DRI.

empleo calificado, del desarrollo de infraestructura avanzada y mejora la seguridad energética de los países.

Cada eslabón de esta cadena desempeña un papel fundamental en la consolidación de la industria del H₂V, consolidando su competitividad y viabilidad en mercados locales e internacionales. La implementación eficiente de estos procesos requiere de una infraestructura habilitante robusta, inversiones estratégicas y un marco normativo adecuado que facilite su escalamiento. A continuación, se detallan las principales etapas que conforman la cadena de valor del H₂VyD, conforme se puede observar en la siguiente figura.

Figura 1. Cadena de valor y potenciales encadenamientos productivos para el hidrógeno verde y derivados. Principales etapas que conforman la cadena de valor del H₂VyD.



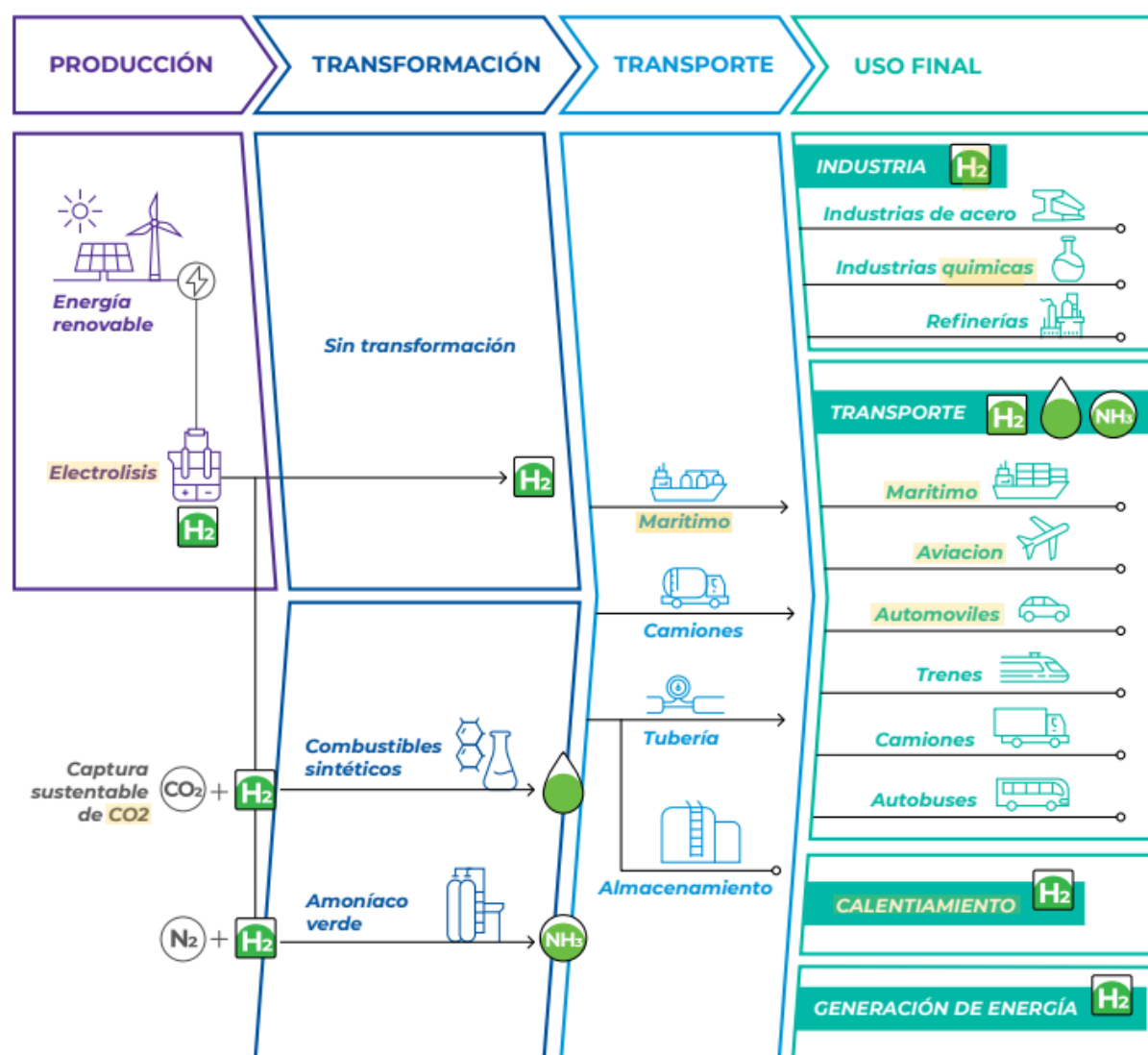
Fuente: Tomado de Ojeda, M. (2023).

En este apartado se detalla la estructura general de la cadena de valor del H₂V y su infraestructura habilitante, resaltando la importancia de cada etapa en la consolidación de una industria eficiente y competitiva.

El adecuado entendimiento de la cadena de valor del H₂V es necesario para la definición de la estructura productiva. A su vez, es muy relevante para comprender los eslabones contenidos y las potenciales demandas laborales y de formación profesional que pueden surgir asociadas a la implementación de estos eslabones de la cadena.

Una visión quizás más simplificada y esquematizada de la cadena de valor del H₂V que contribuya a un mejor entendimiento de su composición y funcionamiento, podría ser la desarrollada por IRENA (2020).

Figura 2. Producción, conversión y usos finales de hidrógeno verde en todo el sistema energético.



Fuente: Irena (2020).

En este contexto, el presente informe tiene como objetivo analizar las posibles implicancias en las características y cantidades de la mano de obra asociada a aquellas etapas o procesos de la cadena de valor del H2V, incluyendo producción y/o captura de CO_2 y N_2 , almacenamiento, transporte y posible uso de diferentes materias primas y productos, que se entiende son factibles de ser implementadas en escala de aquí al 2040 en Uruguay, contemplando el análisis realizado en la Hoja de Ruta de H2V.

Si bien la cadena de valor del H2V es muy abarcativa dada la capacidad y flexibilidad del H_2 para ser implementado en varios usos, el H_2 y sus derivados, se entiende que, en Uruguay, se podría considerar como razonable, se desarrollen las siguientes infraestructuras principales:

Plantas de producción de H2V por electrólisis. A los efectos del presente estudio, no se profundizará en las alternativas técnicas disponibles, sino en estimaciones de demanda de energía eléctrica asociada y las consecuentes dimensiones de los proyectos de EERR asociados.

Plantas de producción de amoníaco (NH₃) y UREA mediante el proceso Haber-Bosch (HB). Las mismas se prevé se desarrollen en zonas costeras, o linderas a los puntos de generación del CO₂ biogénico para su transformación a UREA.

Plantas de producción de metanol (e-MeOH) y combustibles sintéticos (e-fuels), utilizando el proceso Fischer-Tropsch (FT). Se propone que las mismas sean linderas a las fuentes de emisión del CO₂ biogénico, o cercanas a las mismas, en procura de minimizar costos de transporte del CO₂. No obstante ello, dada la necesidad de exportación de los productos finales, se procurará considerar el posicionamiento de las plantas de síntesis en zonas que reúnan condiciones que puedan considerarse razonablemente óptimas en el marco del presente estudio.

Captura y uso del CO₂ (CCU), fundamental para la producción de combustibles sintéticos y productos químicos a partir de CO₂ biogénico. En el presente estudio no se profundizará sobre las alternativas técnicas en el mercado y se pondrá foco en la captura de gases de plantas como las de celulosa.

Captura directa y separación de N₂ del aire (ASU por sus siglas en inglés), esencial para la producción de amoníaco sin depender de fuentes de nitrógeno industrial.

Sistemas de almacenamiento y transporte/distribución de H₂, N₂ CO₂ gaseosos y/o líquidos, incluyendo tuberías de larga distancia. Se entiende conveniente incorporar este análisis en vistas a las condiciones naturales de recurso eólico y solar que dispone Uruguay para una producción eficiente del H₂V y la distancia a las fuentes de CO₂ biogénico y los potenciales puertos de exportación. No se prevé contemplar el transporte de NH₃ o e-MeOH por tuberías entre diferentes puntos geográficos del Uruguay. No se contemplará en el presente estudio el almacenamiento criogénico del H₂V.

Infraestructura de generación de EERR (solar y eólica) para alimentar las plantas de electrólisis y las de síntesis (HB y FT), entre otros. A los efectos del presente estudio, se considerará la instalación de plantas en escala de GW de EERR para la producción de H₂VyD. Si bien es previsible que se instalen plantas de menor porte para la producción de H₂ gaseoso de forma distribuida para el Transporte de Carga Pesada (TdCP), la incidencia en materia de demanda de Mano de Obra no sería significativa, pero sí podría tener un componente de distribución geográfica de valor agregado a los efectos del presente estudio.

Redes eléctricas de alta tensión, necesarias para la transmisión de energía renovable desde los parques solares y eólicos hasta los centros de producción de H₂V. Si bien resulta difícil en esta etapa de análisis poder determinar. La producción de H₂VyD de forma aislada de la red es un aspecto que no se contempla en el presente estudio. En el presente estudio se considerará las plantas de EERR y de producción de H₂VyD integrados al SIN (Sistema Interconectado Nacional), en procura de minimizar las inversiones en infraestructura de red eléctrica y maximizar el aprovechamiento de las redes públicas en beneficio de todas las partes involucradas.

Usos finales del H₂VyD: Las aplicaciones finales del H₂V abarcan múltiples sectores:

Industria Pesada (Acero, Cemento, etc): Producción de acero y cemento sin emisiones de carbono. Considerando las características del mercado local, se presume podría ser conveniente no considerar

la industria pesada en el presente trabajo. Si bien podría identificarse algún caso concreto en el cual pudiera pensarse en la implementación de un reemplazo de fuentes energéticas como combustibles tradicionales por H₂V o la captura del carbono para ser utilizado en sectores como los combustibles sintéticos, estas alternativas se encuentran en etapas tempranas de desarrollo y/o implementación, y puede resultar difícil determinar el impacto que podría llegar a tener para una industria local este tipo de iniciativas. En cualquier caso, es un tema que podría abordarse con un carácter ilustrativo e indicativo, complementario al escenario que se propone en el presente documento.

Transporte Terrestre y Maquinaria Pesada: en este caso se entiende factible la implementación de esta alternativa para camiones para transporte de carga pesada (30 toneladas brutas de peso o superior), muy especialmente considerando que ya hay dos proyectos pilotos vigentes, uno en construcción, y otro el cual ya recibió adjudicación de fondos estatales, y se prevé el inicio de construcción en breve. Otra industria que podría llegar a verse beneficiada con un H₂V competitivo es la agrícola, ya que la producción distribuida de H₂ gaseoso podría ser base del suministro de este combustible para maquinaria agrícola y forestal. El uso de H₂ gaseoso en trenes podría llegar a ser una alternativa a futuro, pero no será considerada en el presente trabajo.

Sector Marítimo: Uso de e-amoniaco y e-metanol como combustibles alternativos. Se entiende que el e-NH₃ se encuentra en una etapa muy temprana de desarrollo para ser considerado como un posible uso final de los productos elaborados en Uruguay, pero, en cualquier caso, este uso final no tendría un efecto significativo sobre el análisis del empleo generado.

Aviación: E-SAF como sustituto sostenible del queroseno. Uruguay tiene una demanda reducida en combustibles de aviación, y el e-SAF podría tener una competencia local con el SAF producido localmente, por lo cual, a los efectos del presente trabajo, se considerará la producción de e-SAF con fines de exportación (escala), no descartando un posible uso futuro local.

Generación de Energía Eléctrica: Uso en turbinas de gas y almacenamiento energético. Considerando la situación del sector de energía eléctrica de Uruguay, el desarrollo de esta tecnología de generación de EE en base a H₂, y otros factores, se entiende que no es previsible una incorporación al 2040 que pueda tener implicaciones relevantes en la mano de obra local, más allá de algún proyecto piloto, proyectos de pequeña escala, o, investigación, innovación, se entiende pertinente no considerar esta alternativa en el presente trabajo.

En el caso de Uruguay, y a los efectos del presente trabajo, considerando los posibles productos finales que podría desarrollarse en Uruguay, sea para consumo del mercado interno, regional o internacional, se entiende que debería profundizarse el análisis de los siguientes productos finales y la cadena de valor asociada:

- H₂ gaseoso para transporte de carga pesada y potencialmente transporte ferroviario o de barcas
- Metanol (e-MeOH) y derivados (combustibles sintéticos)
- Amoniaco y fertilizante nitrogenado (UREA)
- Captura o almacenamiento del agua, las instalaciones de generación de energía eléctrica de origen eólico y solar, redes eléctricas de alta tensión y el posible transporte y almacenamiento de H₂ y CO₂ gaseosos a través de tuberías.

2. Estructura productiva

Dado que el desarrollo futuro de la industria del H2V en Uruguay está sujeto a incertidumbres y diferentes visiones estratégicas, el análisis de impacto ocupacional se realiza sobre la base de dos escenarios principales, definidos para explorar distintas configuraciones de desarrollo hacia un horizonte temporal objetivo 2040, manteniendo la misma escala productiva total a nivel nacional. Con el objetivo de facilitar la lectura en este documento se presentará solamente el escenario 1.

En este escenario, se estructuró la producción de manera centralizada. Esta estructura se caracteriza por una alta concentración geográfica de la producción de H2V asociada a los derivados principales (e-Metanol y Urea) y por el uso de plantas de síntesis de gran capacidad individual, apoyándose en infraestructura logística clave como hidroductos.

Con este objetivo, se realizó un mapeo de la cadena de valor relevante (incluyendo EERR, electrólisis, captura CO2, síntesis de derivados y logística). Este escenario asume una producción total de 970 ktpa (miles de toneladas por año) de H2V para 2040, requiriendo ~9 GW de capacidad de electrólisis. Se caracteriza por una **alta concentración geográfica** de la producción de H2V destinada a derivados (en el Noroeste del país) y por el desarrollo de **plantas de síntesis de gran capacidad** individual, principalmente en el Noroeste y Centro (Durazno). Los productos finales y sus destinos principales son:

- **H2V para Transporte Pesado:** Producción distribuida (110 ktpa) para consumo local.
- **e-Metanol:** Producción total bruta de 3833 ktpa (plantas en Durazno y Paysandú). De esta cantidad, 1323 ktpa se utilizan como materia prima para producir e-SAF, resultando en una producción **neta** de e-Metanol como producto final (para uso local y exportación) de **2510 ktpa**.
- **e-SAF:** Producción de 517 ktpa en Zona Metropolitana, utilizando e-Metanol transportado desde Durazno.
- **Urea:** Producción de 1231 ktpa en Durazno, para mercado local y exportación.

La tabla 1, resume los proyectos individuales de conversión de H2V y sus capacidades nominales para este escenario:

Tabla 1: Proyectos Individuales y Capacidades Estimadas - Escenario de Producción Centralizada.

PLANTAS	Product o Final	Ubicación Planta	Feedstock	Feedstock ktpa	ORIGEN Feedstock	Cap. Unit (ktpa)	Cap. Acum. (ktpa)
1	e-MeOH	CENTRO	H2	634,75	NW	3300	3300
1	e-MeOH	NW	H2	95,25	NW	500	500
1	e-SAF	ZM	e-MeOH	1322,9 ⁵	CENTRO	517	517
1	e-NH3	CENTRO	H2	133	NW	739	739
1	UREA	CENTRO	e-NH3	739 ⁶	CENTRO	1232	1232

⁵ Producido en la zona CENTRO del país, provienen de la planta de 3,300ktpa de e-MeOH

La implementación geográfica y logística considera una **descentralización estratégica**, informada por análisis de localización y viabilidad (como los detallados en Ausenco, 2024):

- La **producción de H₂V (total 973 ktpa)** se concentra masivamente en la región **Noroeste (aprox. 873 ktpa)**, cubriendo Paysandú, Río Negro, Salto), donde se co-localiza con EERR; el H₂ restante (100 ktpa para transporte) se produce de forma distribuida en otras cuatro zonas (Centro, Suroeste, Noreste, Metropolitana).
- El H₂V producido en el Noroeste para derivados (863 ktpa) se transporta mediante **ductos (hidroductos)**: **aprox. 770 ktpa viajan a Durazno (Centro)** y **aprox. 96 ktpa se destinan a Paysandú (Noroeste)**.
- Las **plantas de derivados** se ubican de la siguiente manera:
 - **Durazno**: Alberga la gran planta de **e-MeOH (3333 ktpa de capacidad total)** – que abastece mercado local (510), exportación directa (1500) y el feedstock para SAF (1323) – y la planta integrada de **Urea (1231 ktpa)**. Ambas reciben H₂ por ducto desde el Noroeste y CO₂ de UPM 2.
 - **Paysandú**: Aloja la planta de **e-MeOH para exportación (500 ktpa)**, recibiendo H₂ por ducto/local desde el Noroeste y CO₂ de UPM 1 / Montes del Plata.
 - **Montevideo**: Concentra la planta de **e-SAF (517 ktpa)**, que procesa el e-MeOH recibido por **tren desde Durazno**.
- El **CO₂**, insumo vital (aprox. **6.2 Mtpa** requeridas), se obtiene mediante la **captura de emisiones biogénicas** de las **tres grandes plantas de celulosa (UPM1, UPM2, Montes del Plata)**, cuya disponibilidad ha sido analizada en estudios específicos (Vukasovic y Messina, 2023).
- Los **productos finales y el metanol intermedio** se transportan principalmente por **tren** hacia el Puerto de Montevideo o los puntos de consumo local.

En términos de infraestructura energética, el escenario se basa en la meta de **9 GW de electrólisis** y los **18 GW de EERR dedicados**, establecidos en la Hoja de Ruta. Adicionalmente, se estima necesario instalar **aproximadamente 0.9 GW de nueva capacidad EERR** para abastecer los consumos eléctricos de los procesos downstream (síntesis y captura de CO₂), llevando la huella total de EERR requerida por este escenario a **aproximadamente 18.8 GW**. La construcción de toda esta infraestructura se proyecta en el período **2026-2040**.

Este escenario, por lo tanto, no solo proyecta a Uruguay como un exportador relevante de e-combustibles (e-MeOH, e-SAF), sino que también fortalece al sector agropecuario mediante la producción local de Urea verde (1231 ktpa), reduciendo la dependencia de importaciones y mejorando el perfil ambiental de las exportaciones agrícolas frente a regulaciones como el CBAM⁷.

En conclusión, este escenario representa una estrategia integral y ambiciosa, geográficamente distribuida y coherente con la Hoja de Ruta del H₂V de Uruguay. Capitaliza el vasto potencial

⁶ Producido en la zona CENTRO del país, provienen de la planta de 739ktpa de e-NH₃

⁷ Se reitera que las estimaciones de consumos (H₂/producto), necesidades de CO₂ (aprox. 6.2 Mtpa), y relaciones técnicas son cálculos preliminares realizados en el contexto de este estudio de impacto laboral, y no constituyen un diseño de ingeniería de precisión ni una planificación técnico-económica definitiva.

renovable del país mediante una diversificada cartera de productos para exportación y consumo local, con un fuerte anclaje en el **aprovechamiento del CO₂ biogénico industrial**, particularmente de las plantas de celulosa. Su implementación exitosa significaría un avance sustancial hacia los objetivos de descarbonización (NDCs) del país, promoviendo sinergias interindustriales y un modelo de desarrollo sostenible.

Esta producción se apoya en el objetivo nacional de instalar 9 GW de capacidad de electrólisis, respaldados por 18 GW de capacidad de generación de energía renovable (EERR) específicamente dedicados a ella, complementados por aproximadamente 0.9 GW adicionales de EERR para los procesos industriales downstream. La producción de H₂V asignada en este escenario utiliza una parte significativa (aproximadamente el 75%) de la capacidad potencial máxima de los 9 GW de electrólisis.

Una característica clave de este escenario es una estrategia de producción de H₂V geográficamente diferenciada: una producción masiva y concentrada destinada a la síntesis de derivados, y una producción distribuida a menor escala para el consumo local en transporte.

I. Concentración de Producción para Derivados: Hub Noroeste

La gran mayoría del H₂V, destinado a la producción de e-metanol, e-SAF (vía metanol intermedio) y Urea, se genera en un gran polo productivo ubicado en la región Noroeste del país (abarcando áreas de Paysandú, Río Negro y Salto). Esta región concentra la instalación de electrolizadores que suman 863 ktpa de capacidad de producción de H₂V para derivados.

Se prevé que esta capacidad se alcance mediante la instalación de múltiples proyectos de electrólisis de diversas escalas, co-localizados con sus respectivos parques de generación renovable (principalmente eólicos y solares, constituyendo la mayor parte de los 18 GW base). La estructura de estos proyectos incluiría unidades de gran tamaño, como:

- Proyectos de 100 ktpa H₂/año.
- Proyectos de 150 ktpa H₂/año. (Ajustado según tu lista: 2x150 = 300) -> Revisión según lista anterior: 2x100, 2x50, 4x40, 2x15, 1x100(SAF), 3x50(SAF), 1x133(Urea). Usaré esta lista:
- Proyectos de 133 ktpa H₂/año (para Urea).
- Múltiples proyectos de 100 ktpa H₂/año (para e-MeOH y cadena e-SAF).
- Múltiples proyectos de 50 ktpa H₂/año (para e-MeOH y cadena e-SAF).
- Múltiples proyectos de 40 ktpa H₂/año (para e-MeOH).
- Proyectos de 15 ktpa H₂/año (para e-MeOH).

Esta concentración en el Noroeste responde a la disponibilidad de recursos renovables óptimos y permite generar economías de escala tanto en la producción de H₂V como en la infraestructura de transporte asociada.

II. Producción Distribuida para Transporte Pesado Local

Complementando la producción concentrada, el escenario contempla la generación de 110 ktpa de H₂V gaseoso de forma distribuida específicamente para abastecer la demanda del transporte pesado local. Esta producción se realiza mediante 22 plantas de electrólisis de menor escala (5 ktpa H₂ /

aprox. 35 MW cada una), ubicadas estratégicamente cerca de los centros de consumo logístico en seis zonas clave del país:

- Noroeste (Paysandú/RN/Salto): 10 ktpa (2 plantas).
- Centro (Durazno): 40 ktpa (8 plantas).
- Suroeste (Colonia): 40 ktpa (8 plantas).
- Metropolitana (Montevideo): 10 ktpa (2 plantas).
- Noreste (Tacuarembó/Rivera): 10 ktpa (2 plantas).

Se asume que estas plantas más pequeñas estarían asociadas principalmente a generación solar fotovoltaica co-localizada, dada su menor escala y distribución geográfica más amplia.

III. Logística de Distribución del H2V Producido

La estrategia logística es fundamental en este escenario y diferencia claramente el H2 para derivados del H2 para transporte:

- H2 para Derivados (desde Noroeste): Las 863 ktpa producidas en el polo Noroeste son transportadas mediante una red de ductos dedicados (hidroductos) hasta los centros de síntesis industrial:
 - Un flujo principal de aprox. 770 ktpa se dirige hacia Durazno (Centro), cubriendo distancias del orden de 150-200 km, para alimentar la gran planta de e-MeOH (3333 ktpa) y la planta de Urea (1231 ktpa).
 - Un flujo de aprox. 96 ktpa abastece, mediante ducto de menor distancia o uso local, a la planta de e-MeOH de exportación (500 ktpa) ubicada en Paysandú (Noroeste).
- H2 para Transporte: Las 110 ktpa producidas de forma distribuida se comprimen y almacenan localmente para su uso directo en estaciones de servicio o flotas de transporte pesado en cada región, evitando transportes a larga distancia.

IV. Vinculación con Industria y Exportación

Esta estructura de producción y distribución de H2V se conecta directamente con las plantas industriales y la logística de exportación: el H2 llega por ducto a Durazno y Paysandú donde se transforma en e-MeOH y Urea/e-NH3; parte del e-MeOH de Durazno viaja por tren a Montevideo para convertirse en e-SAF; y los productos finales (e-MeOH de ambas plantas, Urea) se transportan por tren al Puerto de Montevideo para su exportación. La viabilidad de esta compleja red de ductos, ferrocarril y facilidades portuarias es un factor clave analizado en estudios específicos de infraestructura y logística (como el reporte Ausenco referenciado).

V. Introducción a la Síntesis de Derivados

Una vez producido el Hidrógeno Verde (H2V) en los polos de generación, principalmente en la región Noroeste del país, el siguiente paso crucial en este escenario es su conversión en derivados de mayor valor agregado y más fácilmente transportables: e-Metanol (e-MeOH), e-Amoníaco (e-NH3) para producir Urea, y finalmente Combustible Sostenible de Aviación (e-SAF) a partir de e-Metanol. Este

capítulo detalla las plantas industriales propuestas para realizar estas transformaciones, su ubicación estratégica, los procesos tecnológicos involucrados y los flujos de materia prima (particularmente H2V y CO2 biogénico).

En total, de las 973 ktpa de H2V producidas, **863 ktpa se destinan a estos procesos de síntesis**, requiriendo además un suministro masivo y sostenible de aproximadamente **6.2 Mtpa de CO2 de origen biogénico**. La eficiencia y la escala de estas plantas de conversión son determinantes para la competitividad económica de todo el escenario.

Tabla 2. Plantas de Derivados H2V - Ubicación, Productos, Capacidades y Feedstocks.

Planta / Unidad	Ubicación	Producto(s) Clave(s) (Capacidad ktpa)	Destino Principal	Feedstock H2V ¹ (ktpa)	Feedstock Intermedio ² (ktpa)
e-MeOH (Grande)	Durazno	e-MeOH: 3300	Local/Export/SAF Fd	635	-
e-MeOH (Export)	Paysandú	e-MeOH: 500	Export	96	-
e-NH3 (para Urea)	Durazno	e-NH3: 739	Interno (Urea)	133	-
Urea	Durazno	Urea: 1231	Local/Export	-	e-NH3: 739 (Local)
e-SAF	Montevideo	e-SAF: 517	Local/Export		e-MeOH: 1323 (Durazno)
TOTAL H2V Consumido				864	

Fuente: elaboración propia.

Feedstock H2V (ktpa): Consumo de H2V proveniente del hub de producción Noroeste (transportado vía ducto o usado localmente). El total consumido en derivados es 864 ktpa (el total del escenario es 973 ktpa incluyendo transporte).

Feedstock Intermedio (ktpa): Materia prima producida en una planta del escenario y consumida en otra. Se indica el origen entre paréntesis. El N2 (aire) para e-NH3 y el CO2 (~6.2 Mtpa total) no se detallan en esta tabla simplificada.

H2 para e-SAF: El proceso MtJ (Methanol-to-Jet) puede requerir H2 adicional para hidrotratamiento.

Capacidad Feedstock (ktpa): Indica producción destinada a ser materia prima para otra planta del escenario (el e-MeOH de Durazno para e-SAF). Esta capacidad se suma a la Local/Exportación para dar la Total de la planta.

Feedstock H2V (ktpa): Consumo de H2V proveniente del hub Noroeste (transportado vía ducto o usado localmente).

Feedstock Intermedio (ktpa): Materia prima producida y consumida dentro del escenario. Origen entre paréntesis. No se detallan N2 (aire) ni CO2 (~6.2 Mtpa biogénico). H2 opcional para hidrotratamiento de e-SAF provendría de ANCAP.

- Producción de e-Metanol (e-MeOH)

El e-Metanol es un producto central en este escenario, tanto para exportación directa como para su uso como intermediario en la producción de e-SAF. Se contempla la instalación de dos plantas principales con una capacidad combinada de producción final de 3833 ktpa. El proceso fundamental es la **hidrogenación catalítica directa de CO₂**, donde el dióxido de carbono reacciona con el H₂V a alta presión y temperatura sobre un catalizador (típicamente a base de cobre/zinc).

Este proceso requiere reactores de síntesis, sistemas de compresión y recirculación de gases no convertidos, y una sección de destilación multi-etapa para purificar el metanol crudo hasta alcanzar el grado AA (calidad estándar internacional).

● Planta e-Metanol Durazno (Centro):

- **Ubicación:** Estratégicamente situada en Durazno, cerca de la planta de celulosa UPM 2 (fuente principal de CO₂) y con acceso a la infraestructura ferroviaria para el transporte de productos.
- **Capacidad:** Es una planta de **escala mundial** con una capacidad nominal total de **3333 ktpa de e-MeOH**.
- **Insumos:** Recibe aproximadamente **637 ktpa de H₂V** mediante un **ducto dedicado desde el polo de producción Noroeste**, y requiere un suministro de aprox. **4.6 Mtpa de CO₂ biogénico** capturado de UPM 2.
- **Tecnología:** Dada la escala, probablemente emplearía múltiples trenes de síntesis paralelos utilizando tecnologías licenciadas de alta eficiencia (ej. Lurgi MegaMethanol™, Topsoe SynCOR Methanol™, Johnson Matthey).
- **Productos y Destinos:** Esta planta tiene una producción diversificada:
 - **510 ktpa** destinadas al **Mercado Local** (uso industrial, químico o potencialmente como combustible).
 - **1500 ktpa** destinadas a la **Exportación Directa** (transportadas por tren al Puerto de Montevideo).
 - **1323 ktpa** destinadas a ser **Feedstock para la planta de e-SAF** (transportadas por tren a Montevideo).

● Planta e-Metanol Paysandú (Noroeste):

- **Ubicación:** Situada en la región Noroeste, probablemente en las cercanías de Paysandú, aprovechando la producción local de H₂V y la cercanía a otras fuentes de CO₂ biogénico (UPM 1 y/o Montes del Plata).
- **Capacidad:** Planta de tamaño significativo, con **500 ktpa de e-MeOH**.
- **Insumos:** Recibe aproximadamente **96 ktpa de H₂V** producidas en la misma región Noroeste (transporte local o por ducto corto), y requiere aprox. **0.7 Mtpa de CO₂ biogénico**.
- **Tecnología:** Similar a la planta de Durazno, pero a menor escala.

- **Producto y Destino:** Las 500 ktpa de e-MeOH se destinan íntegramente a la **Exportación Directa** (transportadas por tren al Puerto de Montevideo).

- Producción de Urea (Integrada con e-NH3)

Este componente busca la producción de fertilizantes nitrogenados verdes, estratégicos para el sector agrícola nacional y regional. El proceso se realiza en dos etapas integradas en una misma localización.

● Planta Integrada e-NH3/Urea Durazno (Centro):

- **Ubicación:** Co-localizada con la planta grande de e-MeOH en Durazno, aprovechando sinergias logísticas y la cercanía a UPM 2 para el suministro de CO2.
- **Capacidad: 1231 ktpa de Urea** (granulada o perlada).
- **Etapas 1: Síntesis de e-Amoníaco (~747 ktpa):**
 - **Insumos:** 133 ktpa de H2V (recibidas por ducto desde el Noroeste) y Nitrógeno (N2) obtenido de una **Unidad de Separación de Aire (ASU)** criogénica o por adsorción (PSA).
 - **Proceso:** Síntesis Haber-Bosch a alta presión (150-350 bar) y temperatura (400-500 °C) sobre un catalizador (generalmente a base de hierro).
- **Etapas 2: Síntesis de Urea (1231 ktpa):**
 - **Insumos:** El e-NH3 (~747 ktpa) producido internamente y aprox. **0.9 Mtpa de CO2 biogénico** (de UPM 2).
 - **Proceso:** Reacción a alta presión (~140-250 bar) y temperatura (~180-210 °C) de amoníaco y CO2 para formar carbamato de amonio, seguido de su descomposición a urea y agua. Incluye etapas críticas de reciclaje de reactivos no convertidos, concentración de la solución de urea y finalización (granulación o prilado) para obtener el producto sólido. Tecnologías comunes son las de Stamicarbon o Casale/Saipem.
- **Producto y Destino:** Las 1231 ktpa de Urea se destinan tanto al **Mercado Local** como a la **Exportación** (transportadas por tren).

- Producción de e-SAF (Combustible Sostenible de Aviación)

Este producto de alto valor agregado se obtiene a partir del e-Metanol como materia prima intermedia, utilizando la tecnología Methanol-to-Jet (MtJ).

● Planta e-SAF Montevideo (Zona Metropolitana):

- **Ubicación:** Estratégicamente localizada cerca de la refinería de ANCAP en La Teja, facilitando posibles sinergias logísticas o de integración, y próxima al puerto y aeropuerto.
- **Capacidad: 517 ktpa de e-SAF** cumpliendo especificaciones internacionales (ej. ASTM D7566 Anexo A3).

- **Insumo Principal: 1323 ktpa de e-MeOH**, recibido por **tren desde la planta de Durazno**.
- **Proceso (MtJ):** Tecnología especializada (ej. ExxonMobil) que típicamente involucra:
 1. Deshidratación catalítica del metanol a dimetiléter (DME).
 2. Conversión del DME sobre un catalizador de zeolita (ej. ZSM-5) para formar una mezcla de hidrocarburos C5-C11 (similar a gasolina).
 3. Etapas posteriores de refinación (oligomerización, alquilación, hidrotratamiento – puede requerir algo de H2 adicional-, isomerización y fraccionamiento) para ajustar la composición y obtener la fracción de queroseno de aviación (SAF) y posibles co-productos (nafta/gasolina, GLP). Este proceso es intensivo en energía.
- **Producto y Destino:** Las 517 ktpa de e-SAF se destinan tanto al **consumo local** (aerolíneas operando en Uruguay) como a la **exportación**.

- **Suministro Estratégico de CO2 Biogénico**

Un pilar fundamental de este escenario es el uso de CO2 de origen biogénico, lo que reduce significativamente la huella de carbono neta de los derivados producidos.

- **Fuente:** El suministro total de aprox. **6.2 Mtpa de CO2** proviene de la **captura post-combustión (PCC)** en las chimeneas de las **tres grandes plantas de celulosa** del país (UPM-1 - Fray Bentos, UPM-2 Paso de los Toros/Durazno, Montes del Plata en Colonia), tal como se identifica en estudios de disponibilidad (Vukasovic, V. y Messina, D., 2023).
- **Tecnología de Captura:** Presumiblemente **absorción química con aminas**, un proceso maduro que requiere vapor (para regeneración del solvente) y energía eléctrica (para bombas y compresión del CO2 capturado).
- **Logística:** El CO2 capturado y purificado necesita ser comprimido y transportado (probablemente por ductos dedicados o potencialmente por barcaza/tren) desde las plantas de celulosa hasta las plantas de síntesis en Durazno y Paysandú.

- **Consideraciones Energéticas Downstream**

Es crucial destacar que todos estos procesos de síntesis química (MeOH, NH3, Urea, SAF) y la captura/compresión de CO2 son **consumidores netos de energía**, principalmente eléctrica (para compresión, bombeo, separación) y térmica (para reacciones, destilación, regeneración de solventes). La estimación de la demanda eléctrica adicional para estos procesos downstream es del orden de **2.6 TWh/año (aprox. 295 MW de potencia media)**, lo que requiere la instalación de **aprox. 0.9 GW adicionales de capacidad EERR**, que se suman a los 18 GW dedicados a la electrólisis.

- **Generación de energía renovable para H2V y derivados**

Introducción a la Infraestructura de EERR

La viabilidad de este escenario, con su ambiciosa producción de 973 ktpa de Hidrógeno Verde (H2V) y sus derivados (e-Metanol, e-SAF, Urea), depende intrínsecamente de una masiva expansión de la capacidad de generación de energía renovable (EERR). Este capítulo detalla la infraestructura EERR necesaria, estimada en un total de **aproximadamente 18.8 GW**, y su distribución estratégica para alimentar tanto la electrólisis como los procesos industriales downstream.

El escenario contempla dos bloques principales de generación EERR con lógicas de ubicación y conexión distintas:

1. **Bloque Principal para Electrólisis (18 GW):** Cumpliendo con la meta de la Hoja de Ruta del H2V, se instalan 18 GW de EERR dedicados exclusivamente a alimentar los 9 GW de capacidad de electrólisis. Esta energía se genera de forma **co-localizada** con las plantas de producción de H2V.
2. **Bloque Adicional para Procesos Downstream (aprox. 0.9 GW):** Se requiere capacidad EERR adicional para cubrir la demanda eléctrica de las plantas de síntesis (e-MeOH, e-NH3/Urea, e-SAF) y de captura de CO2 biogénico. Se prevé que esta energía se genere de forma centralizada en el **Norte del país** y se transporte a las plantas industriales (ubicadas en Centro, Noroeste y Zona Metropolitana) a través del **Sistema Interconectado Nacional (SIN)**.

A continuación, se detallan las características de cada bloque.

EERR para Electrólisis (18 GW Co-localizados)

Este es el componente principal de nueva generación renovable, directamente vinculado a la producción de H2V y alineado con el objetivo nacional.

- **Capacidad Total: 18,000 MW (18 GW)** instalados.
- **Ubicación:** Co-localizada con las plantas de electrólisis. Dado que la producción de H2V se concentra geográficamente según este escenario (873 ktpa en Noroeste, 100 ktpa distribuidos para transporte), estos 18 GW también se distribuyen proporcionalmente:
 - **Región Noroeste (Paysandú/RN/Salto): aprox. 16,150 MW (16.15 GW).** Esta es la mayor concentración, asociada a la producción de H2 para todos los derivados y una parte del transporte local. Se asume un mix tecnológico **60% Eólico / 40% Solar PV**. (Corresponde a aprox. 9.7 GW Eólicos y 6.45 GW Solares en esta región).
 - **Generación Distribuida (para Transporte H2): aprox. 1,850 MW (1.85 GW).** Esta capacidad alimenta los electrolizadores (~35 MW c/u) para transporte local y se distribuye en las otras cuatro zonas, con tecnología **100% Solar PV**:
 - *Centro (Durazno):* aprox. 740 MW Solares (para 40 ktpa H2).
 - *Suroeste (Colonia):* aprox. 740 MW Solares (para 40 ktpa H2).
 - *Metropolitana (Mvd):* aprox. 185 MW Solares (para 10 ktpa H2).
 - *Noreste (Tac/Riv):* aprox. 185 MW Solares (para 10 ktpa H2).
- **Tecnología y Supuestos:**
 - **Eólica:** Factor de Capacidad (FC) promedio asumido del **45%**.
 - **Solar PV:** Factor de Capacidad (FC) promedio asumido del **23.5%** (valor necesario para que los 18 GW generen la energía requerida para 973 ktpa H2 con eficiencia de electrólisis ~55 kWh/kg).

- **Energía Generada:** Este bloque de 18 GW, con el mix y FCs indicados, genera aproximadamente **54.2 TWh/año**, cubriendo la demanda energética de la electrólisis para producir las 973 ktpa de H2V asignadas.
- **Uso Final Electrones:** Alimentación directa y dedicada a los 9 GW de electrolizadores co-localizados.

EERR para Procesos Downstream (aprox. 0.9 GW vía SIN)

Esta capacidad adicional es necesaria para satisfacer la demanda eléctrica de las plantas que transforman el H2V y el CO2 en los productos finales.

- **Capacidad Total:** aprox. **796 MW (0.9 GW)** instalados.
- **Ubicación:** Se prevé la instalación de estos parques EERR de forma centralizada en zonas con óptimos recursos renovables, probablemente en el **Norte del país**, aprovechando la infraestructura de transmisión existente o planificada.
- **Conexión y Transporte:** A diferencia del bloque anterior, esta energía **se inyecta al Sistema Interconectado Nacional (SIN)** y se transporta a través de la red eléctrica de alta tensión hasta los puntos de consumo industrial en Durazno, Paysandú y Montevideo (plantas de e-MeOH, Urea, e-SAF) y a los sitios de captura de CO2 (UPMs). Esto requerirá análisis y posibles refuerzos de la red de transmisión.
- **Mix Tecnológico:** Se asume el mismo mix y factores de capacidad que para la porción principal de derivados: **60% Eólico (FC 45%) / 40% Solar PV (FC 23.5%)**. (Corresponde a aprox. 478 MW Eólicos y 318 MW Solares).
- **Energía Generada:** Este bloque genera aproximadamente **2.3 TWh/año**.
- **Uso Final Electrones:** Cubrir la demanda eléctrica de:
 - Síntesis de e-Metanol (ambas plantas).
 - Síntesis de e-NH3 y Urea.
 - Síntesis de e-SAF (proceso MtJ).
 - Captura y compresión de CO2 biogénico (PCC en UPMs).

Resumen esquematizado

La siguiente tabla detalla la capacidad de EERR estimada para cada grupo de proyectos, asumiendo un mix 60% Eólico (FC 45%) / 40% Solar PV (FC 23.5%). La capacidad total de EERR asignada a estos proyectos es de 15,966 MW, parte de los 18 GW base.

Tabla 3 - EERR Co-localizada para Producción de H2V para Derivados (Noroeste).

Uso Final	Proyecto H2V (ktpa/unidad)	Cant. Proyectos	H2V Total (ktpa)	Eólica Inst. (MW)	Solar Inst (MW)	EERR Total (MW)
Urea	1 x 133	1	133	1,476	984	2,46
Cadena e-SAF	1 x 100	1	100	1,11	740	1,85
	3 x 50	3	150	1,665	1,11	2,775
Subtotal SAF		4	250	2,775	1,85	4,625

e-MeOH (Final)	2 x 100	2	200	2,22	1,48	3,7
	2 x 50	2	100	1,11	740	1,85
	4 x 40	4	160	1,776	1,184	2,96
	2 x 15	2	30	333	222	555
Subtotal MeOH		10	490	5,439	3,626	9,065
TOTAL DERIVADOS		15	873	9,69	6,46	15,966 MW

Fuente: elaboración propia.

EERR Co-localizada para Producción de H2V para Transporte (Total 110 ktpa H2) Las 110 ktpa de H2V gaseoso para transporte se producen en 22 plantas distribuidas de 5 ktpa H2 (~35 MW electrólisis). Se asume que estas son alimentadas por **100% Solar PV (FC 23.5%)** co-localizada. La capacidad total de EERR asignada a estos proyectos es de **2,035 MW**, parte de los 18 GW base.

Tabla 4: EERR Co-localizada para Producción de H2V para Transporte.

Zona Geográfica Prod. H2V	H2V Producido (ktpa)	Cant. Proyectos (5 ktpa c/u)	Mix EERR (%) (Eol/Sol)	Potencia Eólica Instalada (MW)	Potencia Solar Instalada (MW)	Potencia EERR Total (MW)
Noroeste (Paysandú/R N/Salto)	10	2	0% / 100%	0	185	185
Centro (Durazno)	40	8	0% / 100%	0	740	740
Suroeste (Colonia)	40	8	0% / 100%	0	740	740
Metropolitana (Mvd)	10	2	0% / 100%	0	185	185
Noreste (Tac/Riv)	10	2	0% / 100%	0	185	185
TOTAL (para Transporte)	110	22	100% Solar	0	2,035	2,035 MW

Fuente: elaboración propia.

EERR para Procesos Downstream (vía Red Eléctrica). Dentro del bloque total de EERR adicional necesario (estimado en 0.9 GW), la siguiente tabla desglosa la capacidad estimada requerida para cada proceso principal. Se mantiene el mix **60% Eólico (FC 45%) / 40% Solar PV (FC 23.5%)** para esta capacidad adicional.

Tabla 5: EERR Adicional Estimada para Procesos Downstream por Consumidor.

Proceso / Planta Consumidora	Ubicación Consumo	Demanda Potencia Media (MW)	Potencia Eólica Asociada (MW)	Potencia Solar Asociada (MW) ²	Potencia EERR Total Asociada (MW) ²
e-MeOH (3300 ktpa)	Durazno	75	137	91	228
e-MeOH (500 ktpa)	Paysandú	11	21	14	35
e-NH3 (para Urea)	Durazno	8	14	10	24
Urea (1231 ktpa)	Durazno	17	31	20	51
e-SAF (517 ktpa)	Montevideo	41	75	50	125
Captura CO2 @ UPM 2 (5440 ktpa)	Durazno Área	124	226	150	376
Captura CO2 @ UPM 1 (688 ktpa) ³	Fray Bentos Área	16	29	19	48
TOTAL DOWNSTREAM	-	292	533	354	887 MW

Fuente: elaboración propia.

Demanda Potencia Media (MW): Potencia eléctrica promedio requerida por el proceso downstream indicado.

Potencia EERR Asociada (MW): Capacidad EERR **adicional** ubicada en el Norte, conectada vía SIN. Mix 60% Eólica (FC 45%) / 40% Solar (FC 23.5%). Suma total 887 MW (0.9 GW), adicional a los 18 GW para electrólisis.

Captura CO2: Indica la demanda y EERR asociada a la captura del CO2 necesario para las plantas de derivados (total ~6.1 Mtpa), realizada en las proximidades de las plantas de celulosa indicadas.

Capacidad Total EERR y Conclusiones

Sumando la EERR co-localizada para electrólisis (18,000 MW) y la EERR adicional para procesos downstream (888 MW), este escenario requiere la instalación de una **capacidad total de EERR de 18.888 MW (18.9 GW)⁸** entre 2026 y 2040. De esta capacidad total, **10.223 MW (10.2 GW)** serían

⁸ Las cifras de capacidad EERR y energía generada son estimaciones basadas en los parámetros definidos para este escenario (mix tecnológico, FC, eficiencia electrólisis) y su propósito principal es contextualizar el análisis de impacto laboral. Se reitera que todos los valores de capacidad EERR (MW), distribución geográfica, mix tecnológico, demanda de potencia (MW), energía (GWh/año), relaciones técnicas y factores de capacidad utilizados en este capítulo son estimaciones indicativas y de referencia, elaboradas con el propósito principal de establecer bases para la posterior estimación de demanda de empleo y mano de obra asociada al despliegue de infraestructura energética del Escenario 1. No constituyen cálculos técnicos especializados ni exactos y no deben ser considerados como valores definitivos para diseño de ingeniería, estudios de factibilidad técnico-económica o planificación detallada de proyectos. Se recomienda un uso responsable y apropiado de estos

eólicos y 8.665 MW (8.7 GW) serían solares fotovoltaicos. Esta masiva incorporación de renovables, distribuida geográficamente pero con una fuerte concentración en el Noroeste para la producción a gran escala, representa el pilar fundamental del escenario. Su desarrollo exitoso requerirá una planificación detallada de uso de suelo, permisos, inversiones, desarrollo de cadenas de suministro y, de forma crítica, la adecuación y expansión de la red eléctrica nacional (SIN) para gestionar tanto la conexión de la generación como el transporte de energía a los centros de consumo industrial. La estrategia de co-localizar la mayor parte de la EERR (18 GW) con la electrólisis mitiga parcialmente los requerimientos de transmisión, pero la conexión al SIN sigue siendo necesaria para la estabilidad y para el bloque downstream.

La viabilidad de instalar esta capacidad dependerá crucialmente de factores como la disponibilidad de terrenos, los procesos de permisos ambientales y sociales, el desarrollo de la cadena de suministro local, la atracción de inversiones y, fundamentalmente, la expansión y refuerzo de la red de transmisión eléctrica (SIN) para conectar la generación (especialmente la del Norte para downstream) con los centros de consumo industrial. La estrategia de co-localizar la mayor parte de la EERR (18 GW) con la electrólisis mitiga parcialmente los requerimientos de transmisión, pero la conexión al SIN sigue siendo necesaria para la estabilidad y para el bloque downstream.

- **Captura Y Uso Del Co2 Biogénico**

El Dióxido de Carbono (CO₂) es, junto al Hidrógeno Verde (H₂V), la materia prima esencial para la síntesis de e-Metanol, e-SAF (vía metanol) y Urea en este escenario. Estratégicamente, se opta por CO₂ de origen biogénico para asegurar la sostenibilidad y cumplir con los criterios de mercados de exportación clave como la UE (normativa RFNBO) (Ref. Conceptual: Inicio - Requisitos Exportación RFNBO; Inicio - RFNBO Compliance Analysis). Las plantas de derivados definidas (3833 ktpa de e-Metanol total y 1231 ktpa de Urea) tienen una demanda neta de CO₂ como reactivo de 6.1 Mtpa (millones de toneladas por año: 5.2 Mtpa para metanol + 0.9 Mtpa para urea). Este capítulo detalla las fuentes identificadas, la tecnología de captura, la estrategia para asegurar el suministro neto requerido (considerando eficiencias y pérdidas) y su uso final.

Fuentes de CO₂ Biogénico: Potencial y Origen en Plantas de Celulosa

Las tres grandes plantas de celulosa tipo Kraft (UPM 1, UPM 2, Montes del Plata) son las fuentes primordiales, con un potencial de emisión biogénica conjunta superior a 9 Mtpa. Las emisiones provienen principalmente de calderas de recuperación y biomasa (*Kuparinen et al., 2019*). Este potencial excede la demanda neta del escenario, pero la *cantidad efectivamente capturable* dependerá de la tecnología y su integración. El carácter biogénico certificado es vital para la conformidad RFNBO.

Tecnología de Captura Primaria: Captura Post-Combustión (PCC)

La tecnología base es la Captura Post-Combustión (PCC) con aminas, por ser madura y adaptable a las plantas de celulosa. Opera absorbiendo CO₂ de los gases de combustión y liberándolo con alta pureza mediante regeneración con vapor y consumo de electricidad. Es crucial que esta energía sea de bajas emisiones (*Inicio - RFNBO Compliance Analysis*). La integración energética con la planta

números en el contexto del presente análisis laboral.

anfitriona es un desafío técnico-económico clave (Ref. Técnica: Kuparinen et al., 2019; Conceptual: Ausenco, 2024).

Volumen de Captura Bruto Requerido y Estrategia de Suministro

- Necesidad Neta (Utilización): Las plantas de derivados consumirían en el entorno de las 6.1 - 6.2 Mtpa de CO₂.
- Estimación del Volumen Bruto: Para asegurar la entrega efectiva de estas 6.1 Mtpa netas en los puntos de consumo, es necesario compensar no solo la eficiencia intrínseca de las plantas de captura PCC (típicamente 80-90%), sino también las posibles pérdidas, mermas o ineficiencias acumuladas durante las etapas posteriores de purificación, compresión y transporte. Considerando estos factores sistémicos, se estima que la captura bruta total requerida en las chimeneas de las plantas de celulosa debe ser del orden de 7.2 a 7.5 Mtpa. Este volumen bruto sigue estando dentro del potencial total identificado (>9 Mtpa) de las tres pasteras.
- Asignación Indicativa de Captura Bruta (cifras indicativas):
 - Suministro a Durazno (Necesita 5.4 Mtpa netas): Requeriría una captura bruta agregada de aproximadamente 6.3 - 6.6 Mtpa (considerando una eficiencia global de entrega del ~81-85%). Esta captura provendría de UPM 2 (maximizando su potencial, ej., 4.0 Mtpa) y UPM 1 (aportando el resto, ej., 2.3 - 2.6 Mtpa).
 - Suministro a Paysandú (Necesita 0.7 Mtpa netas): Requeriría una captura bruta de aproximadamente 0.8 - 0.9 Mtpa. Esta provendría de Montes del Plata.
- Contingencia: Si la captura práctica total optimizada en las 3 pasteras no alcanza los 7.2-7.5 Mtpa brutos necesarios, se activaría la opción de gasificación de biomasa residual con captura pre-combustión para cubrir el déficit.

Requerimientos de Transporte de CO₂

Se requiere una red de ductos para transportar el CO₂ capturado y comprimido (fase densa) desde las 3 plantas de celulosa hasta Durazno y Paysandú, dimensionada para manejar los volúmenes brutos capturados (7.2 - 7.5 Mtpa). Las emisiones asociadas al transporte deberían incluirse/considerarse en el análisis de ciclo de vida del producto final.

Uso Final del CO₂ (Consumo Neto)

El CO₂ biogénico purificado y transportado se utiliza como materia prima neta en:

- Síntesis de e-Metanol (Plantas Durazno y Paysandú): Consumo neto total 5.2 Mtpa.
- Síntesis de Urea (Planta Durazno): Consumo neto total 0.9 Mtpa.

CO₂ Neto Total Utilizado: $5.2 + 0.9 = 6.1$ Mtpa.

Consideraciones Finales y Certificación

La captura y suministro de 7.2 a 7.5 Mtpa brutas de CO₂ es una operación logística e industrial a gran escala. Requiere inversiones significativas en captura y transporte (Ref. Conceptual: Ausenco, 2024;

Informes Puertos - RHDHV/PoR, 2024), gestión del consumo energético (térmico y eléctrico), y acuerdos robustos con las plantas de celulosa. Crucialmente, para la exportación a mercados regulados, se necesitarán:

- Sistemas MRV: Para verificar el origen biogénico y la cantidad capturada/utilizada.
- Certificación: Uso de esquemas reconocidos (ISCC, CertifHy, etc.) para validar el cumplimiento de criterios RFNBO y las reducciones de GEI (Ref. Conceptual: Inicio - Requisitos Exportación RFNBO; Inicio - RFNBO Compliance Analysis).

● **Infraestructura de Transporte de Energía Eléctrica, H2 y CO2**

La implementación a gran escala de este escenario no solo requiere una masiva capacidad de generación de energía renovable (EERR) y producción de Hidrógeno Verde (H2V), sino también una robusta infraestructura para transportar la energía en sus distintas formas (electrones, moléculas de H2, moléculas de CO2) desde los puntos de generación/captura hasta los centros de consumo o transformación industrial. Este capítulo describe la infraestructura de transporte estimada para la red eléctrica asociada a los procesos downstream, los ductos para H2V (hidroductos) y los ductos para CO2 biogénico. Los detalles sobre el transporte de los productos finales (e-MeOH, Urea, e-SAF) por ferrocarril se abordan en otros análisis logísticos. Cada componente de producción (EERR, H2V) y consumo (plantas de derivados) requerirá un nodo de conexión específico y claramente definido a estas redes de transporte.

Red Eléctrica para Procesos Downstream (Transporte de Electrones vía SIN)

Se requiere una capacidad EERR adicional de 888 MW (0.9 GW) para alimentar los procesos industriales de síntesis y captura de CO2. Se prevé que esta generación (mix 60% Eólico / 40% Solar) se concentre en un emplazamiento en el Norte del país, aprovechando los recursos óptimos, y que la energía sea transportada a los puntos de consumo (Durazno, Paysandú, Montevideo) a través del Sistema Interconectado Nacional (SIN).

La arquitectura estimada para este transporte eléctrico incluye:

- Generación y Conexión al SIN: Se asume generación en media tensión (ej. 30 kV) en el Norte. Se requerirá la construcción de una nueva Subestación Transformadora Elevadora principal (30/500 kV) en la propia zona de generación. Esta subestación no solo elevará la tensión para minimizar pérdidas, sino que también funcionará como el punto de interconexión directo con el Sistema Interconectado Nacional (SIN). Deberá contar con la capacidad de transformación (888 MW) y el equipamiento de maniobra y protección necesarios (interruptores, seccionadores, sistemas de control) para una conexión segura y fiable a la red de 500 kV existente o reforzada. La necesidad de construir nuevos tramos de línea de 500 kV dependerá de la distancia desde esta subestación al punto más cercano de la red troncal del SIN con capacidad suficiente.

- Transporte vía SIN: La energía eléctrica fluirá desde el punto de interconexión en el Norte a través de la red nacional de alta tensión existente y/o reforzada hasta las cercanías de los centros de consumo industrial.
- Conexión y Bajada de Voltaje en Plantas Industriales: Las plantas consumidoras (e-MeOH en Durazno/Paysandú, Urea en Durazno, e-SAF en Montevideo, y unidades de captura de CO₂) se conectarán al SIN, probablemente a través de nuevas subestaciones de 150 kV (o la tensión disponible localmente en la red de UTE) en cada sitio industrial. Estas subestaciones tomarán energía de la red y la transformarán a los niveles requeridos por los procesos. Cada proyecto (generación y consumo) dispondrá de un nodo de conexión definido.

Transporte de Hidrógeno Gaseoso (Hidroductos)

Para transportar eficientemente el gran volumen de H₂V (863 ktpa) producido en el concentrado hub del Noroeste (Paysandú/RN/Salto) hasta las plantas de derivados en Durazno y Paysandú, este escenario contempla el desarrollo de una red de ductos dedicados de alta presión (hidroductos). El transporte por ducto se considera la opción más económica y eficiente para mover grandes cantidades de hidrógeno a distancias significativas, comparado con alternativas como el transporte criogénico líquido o mediante portadores químicos (*Ref. Conceptual: EHB - Corridors; AFRY/RINA - Gulf to Europe; ANZ - Hydrogen Transportation*).

La configuración de red propuesta es la siguiente:

- Ductos Principales Noroeste -> Durazno (Centro):
 - Función: Abastecer la demanda combinada de 770 ktpa H₂ de las plantas de e-MeOH (3300 ktpa) y Urea (1231 ktpa) en Durazno.
 - Configuración: Se proyectan dos hidroductos principales paralelos, originándose en las áreas de producción del Noroeste y convergiendo cerca de Pueblo Centenario/Durazno. Esta configuración en paralelo ofrece redundancia, seguridad de suministro y flexibilidad para la construcción y operación escalonada. Se estima un trazado con orientaciones predominantes Este-Oeste y Norte-Sur para optimizar la recolección del H₂ producido en diferentes puntos del hub Noroeste.
 - Distancia: Estimada en 100 a 150 km por cada ducto.
 - Especificaciones Técnicas:
 - Presión: Operarían a alta presión, en el rango típico para transmisión de H₂ de 70-100 bar.
 - Materiales: Construidos en acero de alta resistencia, con grados y especificaciones cuidadosamente seleccionados para minimizar los riesgos de fragilización por hidrógeno, un aspecto crítico en el diseño de hidroductos. Podrían considerarse recubrimientos internos o tecnologías de materiales avanzados (*Ref. Conceptual: AFRY/RINA; ANZ*). La selección final dependerá de estudios de ingeniería de detalle.
 - Diámetro (Variable/Telescópico): Debido a la inyección de H₂ desde múltiples plantas a lo largo del trazado dentro del Noroeste, el diámetro de los ductos aumentará progresivamente. Se estima un diseño telescópico con 2 o 3 secciones, comenzando con diámetros menores (ej. DN 250-400 mm) en los extremos y alcanzando diámetros mayores (ej. DN 500-600 mm o

más) en los tramos finales hacia Durazno para manejar el flujo acumulado de cada línea (~385 ktpa).

- Compresión Intermedia: El transporte de H₂ requiere considerablemente más energía de compresión que el gas natural para la misma energía transportada (*EHB; ANZ*). Para ductos de 100-150 km, y dependiendo de la presión de operación y el perfil del terreno, es muy probable que se requiera al menos 1 estación de recompresión (booster) intermedia en cada uno de los dos corredores a Durazno. Estas estaciones utilizarían compresores diseñados específicamente para hidrógeno (*Siemens/Gascade*).
- Ducto Noroeste -> Paysandú:
 - Función: Transportar 96 ktpa H₂ para la planta de e-MeOH de 500 ktpa en Paysandú.
 - Distancia: Estimada en 50-70 km.
 - Ducto: Diámetro menor (ej. DN 250-350 mm), probablemente más constante. Operando a presiones similares (70-100 bar).
 - Compresión Intermedia: Debido a la menor distancia, probablemente no se requieran estaciones intermedias.
- Infraestructura de Conexión de Plantas H₂V:
 - Se requerirán 15 puntos de conexión (nodos) para inyectar el H₂ desde cada planta de producción para derivados en el Noroeste a la red de ductos.
 - Cada estación de inyección incluirá típicamente:
 - Acondicionamiento Final: Sistemas para asegurar la alta pureza y el punto de rocío requeridos por el ducto (*AFRY/RINA*).
 - Compresión Dedicada: Equipos para elevar la presión del H₂ desde la salida del electrolizador hasta la presión de línea (70-100 bar).
 - Medición Fiscal: Medidores de flujo másico y calidad específicos para hidrógeno.
 - Seguridad y Control: Válvulas de aislamiento, retención, alivio de presión y sistemas de parada de emergencia (ESD).
 - Esta configuración implica una red de recolección de ductos de menor diámetro dentro del hub Noroeste que converge en los ductos principales de transmisión.
- Estaciones de Recepción: Se necesitarán estaciones en los puntos de entrega (Durazno y Paysandú) para reducir la presión según los requerimientos del proceso consumidor, realizar la medición final y distribuir el H₂ dentro del complejo industrial.
- Construcción: Aunque internacionalmente se discute la reconversión de gasoductos existentes (*EHB; AFRY/RINA; Siemens*), la escala y las rutas específicas de este escenario sugieren que se trataría mayormente de la construcción de hidroductos nuevos y dedicados.

Ductos de CO₂ (Transporte del Volumen Bruto Capturado)

Para transportar el dióxido de carbono desde los puntos de captura en las tres plantas de celulosa hasta los centros de síntesis en Durazno y Paysandú, se contempla una red dedicada de ductos. Es crucial que estos ductos estén dimensionados para manejar el volumen bruto total capturado en origen, se estima entre 7.2 y 7.5 Mtpa, para asegurar la entrega neta requerida (6.1 Mtpa) en destino.

Se asume que el transporte se realizaría en fase densa (presiones superiores a 74 bar) para mayor eficiencia volumétrica. La red principal constaría de los siguientes tramos (capacidades brutas indicativas):

- Suministro a Durazno: Uno o más ductos transportando un flujo agregado bruto de 6.3 a 6.6 Mtpa de CO₂, proveniente de las capturas en UPM2 (Paso de los Toros) y UPM1 (Fray Bentos). Los diámetros podrían variar (ej., DN400-600mm) dependiendo de las distancias y el diseño final.
- Suministro a Paysandú: Un ducto transportando un flujo bruto de 0.8 a 0.9 Mtpa de CO₂, proveniente de la captura en Montes del Plata. Se estima un diámetro de DN150-250mm para una distancia de 100-120 km.

El diseño, selección de materiales (aptos para CO₂ con posibles impurezas), construcción (considerando trazado y cruces) y operación segura (monitoreo de presión, detección de fugas) de esta red de ductos de CO₂ representan un componente de infraestructura clave para el escenario.

Consideraciones Adicionales e Infraestructura Asociada

La construcción y operación de esta extensa red de transporte energético implica desafíos significativos en ingeniería detallada (trazados, diseño específico de ductos y estaciones), la gestión compleja de permisos y derechos de paso, la implementación de rigurosos estándares de seguridad para H₂ y CO₂ a alta presión, y una inversión económica muy considerable. El diseño y establecimiento de nodos de conexión claros y estandarizados será fundamental para la integración eficiente de todos los componentes del sistema.

3. Impacto en demanda de mano de obra

Con el objetivo de estimar la demanda de empleo asociada a la estructura productiva definida en el capítulo anterior se realiza una identificación y descripción exhaustiva de los perfiles ocupacionales clave requeridos en cada componente tecnológico y fase (Construcción CAPEX y Operación O&M). A su vez, se aplica una metodología cuantitativa para estimar la demanda de empleo directo e indirecto, basada en factores de empleo específicos por tecnología y fase.

En este sentido, en este apartado se aplican los factores de empleo directo específicos y conservadores, definidos y justificados en el Anexo 1, a los parámetros de capacidad física (MW, ktpa, km, número de unidades) de los componentes tecnológicos descritos en la estructura productiva (apartado 2).

El objetivo es obtener una **estimación preliminar y agregada** del volumen total de trabajo directo asociado a la fase de construcción (expresado en Personas-Año totales) y de la plantilla directa estable requerida para la operación y mantenimiento hacia 2040 (Equivalente a Tiempo Completo).

Se subraya que estos son **resultados preliminares** y se basan en una aplicación directa de los factores adoptados, sirviendo como una primera cuantificación agregada y una línea base de referencia. No incluyen análisis temporal detallado (phasing), distribución geográfica fina, ni ajustes complejos por

curvas de aprendizaje o interacciones sistémicas. El foco de esta cuantificación permanece exclusivamente en el **empleo directo**.

Metodología de Cálculo Preliminar

La estimación preliminar se basa en la aplicación de la fórmula central para cada componente tecnológico (i) y fase (j = CAPEX u O&M):

$$\text{EmpleoDirecto}_{i,j} = \text{FactorDirecto}_{i,j} (\text{Cap. V}) * \text{Capacidad}_i (\text{Cap. III})$$

Para la fase **CAPEX**, se multiplica el Factor Directo CAPEX (en Personas-Año / unidad de capacidad) por la capacidad total del componente en el escenario para obtener el total de Personas-Año directas de construcción. Para la fase **O&M**, se multiplica el Factor Directo O&M (en FTE (Equivalente a Tiempo Completo) / unidad de capacidad) por la capacidad total del componente en el escenario para obtener el total de FTEs anuales directos estables estimados hacia 2040.

Resultados Preliminares: Empleo Directo en Construcción (CAPEX)

La Tabla 6 presenta los resultados de la aplicación de los factores directos CAPEX conservadores a las capacidades. La aplicación directa de los factores conservadores y las capacidades ajustadas resulta en **una estimación preliminar del volumen total de trabajo directo en todo el período de construcción de aproximadamente 48.400 Personas-Año para este escenario**.

Los principales contribuyentes a este volumen de trabajo son la **Electrólisis de Gran Escala** (~12,300 Pers-Año) y la **Generación EERR** (~13,000 Pers-Año combinando eólica y solar). Componentes como e-Metanol, Urea, e-SAF y Captura de CO2 tienen una contribución individual menor (~3,000-3,600 Pers-Año cada uno con los factores adoptados). La infraestructura (Ductos, Líneas, SE) también suma una cantidad relevante (~8,000-8,700 Pers-Año).

Se reitera la **nota importante sobre Electrólisis**: el total calculado aquí para el bloque completo (~15,600 Pers-Año directos) es significativamente mayor que las cifras agregadas (~6.5k / 7.5k). Esta discrepancia, que surge al usar los factores (incluso los más conservadores) derivados de los análisis específicos de las plantas de 5ktpa y 1GW, deberá ser analizada.

Tabla 6: Estimación Preliminar Empleo Directo CAPEX (Personas-Año) por Componente

Componente	Unidad	Factor CAPEX D	Capacidad	Empleo CAPEX
EERR Eólica	MW	0.8	10200	7854
EERR Solar	MW	0.6	8700	5133
Ely Pequeña (TCP)	ktpa H2	30.0	110	3300
Ely Grande (Derivados)	MWe	1.5	8230	12345
e-Metanol	ktpa	0.8	3800	3154
Urea	ktpa	2.4	1234	2961.6

e-SAF	ktpa	6.0	517	3102
Captura CO2	ktpa CO2	0.5	7200	3600
Ductos H2	km	4.0	360	1440
Ductos CO2	km	4.0	500	2000
Línea AT 500kV	km	4.0	500	2000
Subestación AT 500kV	SE	150.0	10	1500
Infra. Puerto/Logística	N/A	0.0	1	0.0
TOTAL				48.389

Nota: Factores para Captura CO2 y Ductos CO2/H2 son conservadores basados en análisis/proxys disponibles. Empleo para Infra. Puerto/Logística se asume cero aquí. Capacidades de Ductos CO2 y Líneas AT (S1) son placeholders.

Resultados: Empleo Directo en Operación y Mantenimiento (O&M)

La Tabla 7 presenta los resultados de la aplicación de los factores directos O&M conservadores a las capacidades, estimando la plantilla estable hacia 2040. La estimación del empleo directo estable en O&M hacia 2040, aplicando los factores conservadores, es de **4.010 FTEs** (Equivalente a Tiempo Completo). Los mayores generadores de empleo permanente en O&M son la **EERR** (~1,325 FTE), la **Electrólisis** (~1,170 FTE sumando ambas escalas) y la planta de **e-Metanol** (~875 FTE). Los demás componentes tienen contribuciones individuales menores (< 220 FTE cada uno).

Similar al caso CAPEX, el O&M calculado para Electrólisis (~1,170 FTE) es superior a las cifras agregadas mencionadas para Cap. X (~700-800 FTE), lo que refuerza la necesidad de una reconciliación posterior.

Tabla 7: Estimación Empleo Directo O&M (FTE @ 2040) por Componente.

Componente	Unidad	Factor O&M D	Capacidad	Empleo O&M
EERR Eólica	MW	0.1	10200	1020
EERR Solar	MW	0.04	8700	304.5
Ely Pequeña (TCP)	ktpa H2	5.0	110	550
Ely Grande (Derivados)	MWe	0.08	8230	617.25
e-Metanol	ktpa	0.23	3800	874
Urea	ktpa	0.15	1234	185.1

e-SAF	ktpa	0.2	517	103.4
Captura CO2	ktpa CO2	0.03	7200	216
Ductos H2	km	0.07	360	25.2
Ductos CO2	km	0.14	500	70
Línea AT 500kV	km	0.05	500	25
Subestación AT 500kV	SE	2.0	10	20
Infra. Puerto/Logística	N/A	0.0	1	0
TOTAL				4.010

Nota sobre Tabla VI.2: Factores para Captura CO2 y Ductos CO2/H2 son conservadores basados en análisis/proxys disponibles. Empleo para Infra. Puerto/Logística se asume cero aquí. Capacidades de Ductos CO2 y Líneas AT (S1) son placeholders.

Conclusiones

La aplicación directa de los factores de empleo conservadores a las capacidades proporciona una primera estimación cuantitativa agregada del impacto laboral directo. Los resultados preliminares sugieren un volumen total de empleo en toda la etapa de construcción del orden de **~48.000 Personas-Año** y una plantilla estable en O&M hacia 2040 de aproximadamente **~4.000 FTEs** (Full Time Equivalent).

Esta cuantificación, detallada en las Tablas 6 y 7, muestra la importancia relativa de cada componente (destacando EERR, Electrólisis y e-Metanol).

4. Descripción de perfiles ocupacionales por componente tecnológico

La implementación exitosa de la cadena de valor del hidrógeno verde (H₂V) y sus derivados en Uruguay, tal como se proyecta en los escenarios de este estudio, dependerá no solo de la inversión en infraestructura, sino fundamentalmente de la disponibilidad de capital humano con las competencias adecuadas. Este capítulo se adentra en el corazón de esa necesidad, proporcionando una **descripción detallada de los perfiles ocupacionales** requeridos para la construcción, operación y mantenimiento de cada **componente tecnológico específico** que conforma la cadena de valor analizada.

Desde la instalación de parques eólicos y solares hasta la operación de complejas plantas de electrólisis, síntesis de e-combustibles (metanol, SAF), producción de fertilizantes verdes (amoníaco/urea), captura de CO₂ e infraestructura de transporte asociada (ductos, redes eléctricas), se busca caracterizar las tareas principales, las habilidades técnicas y blandas esenciales, y la formación o certificaciones típicamente asociadas a cada rol.

Este análisis pormenorizado por tecnología, basado en la revisión de benchmarks internacionales, estándares industriales y consultas con actores relevantes (como se detalla en la introducción

general), es esencial para comprender la diversidad y especificidad de la demanda laboral que generará el sector. Dicha caracterización sienta las bases para la posterior agregación y análisis estructural de la fuerza laboral, la identificación de brechas de habilidades y la vinculación con la oferta formativa nacional que se abordarán en el capítulo siguiente.

Perfiles Ocupacionales Para Construcción De EERR (Eólica Onshore Y Solar Fotovoltaica)

La materialización de la infraestructura de generación renovable de este escenario, que implica la instalación de aproximadamente **18.8 GW** de potencia eólica y solar fotovoltaica entre 2026 y 2040, constituye la fase de mayor intensidad laboral y diversidad de perfiles del proyecto global. Esta etapa abarca desde las actividades tempranas de desarrollo e ingeniería hasta la construcción, montaje, comisionado y puesta en marcha de los parques. La planificación y disponibilidad de personal con las capacidades adecuadas es un factor crítico para el éxito, como lo demuestran análisis internacionales sobre empleo en renovables (ej. *IRENA & ILO, 2023; IRENA & ILO, 2024*) y estudios específicos sobre los desafíos de la transición energética en diversos países (ej. *Osorio-Aravena et al., 2025* para Chile; *Accenture/ETI* para Australia). El informe del MTSS de Uruguay (*Informe final Energías renovables, 2024*) también subraya la importancia de alinear la formación con las necesidades del sector.

A continuación, se detallan los perfiles ocupacionales clave identificados para esta fase constructiva:

A. Desarrollo, Ingeniería de Diseño y Detalle (Fases Tempranas y de Soporte - Mayormente Off-Site/Indirecto)

Aunque gran parte de este trabajo no ocurre físicamente en el sitio de construcción final, es esencial para viabilizar y definir el proyecto.

- **Gerente/Líder de Desarrollo de Proyectos:** Profesional responsable de llevar el proyecto desde la idea inicial hasta la decisión final de inversión (FID). Requiere una combinación de visión técnica, financiera y regulatoria.
 - *Responsabilidades Clave:* Identificación y aseguramiento de terrenos, estudios de viabilidad técnico-económica, gestión de estudios de impacto ambiental y social, obtención de permisos y licencias preliminares, relacionamiento con actores clave (gobierno, comunidades, financiadores), estructuración financiera inicial.
 - *Capacidades/Formación:* Titulación superior (Ingeniería, Economía, Administración, Derecho). Experiencia significativa en desarrollo de proyectos de infraestructura/energía, idealmente renovable. Conocimiento profundo del marco regulatorio energético y ambiental uruguayo. Habilidades de negociación, gestión de riesgos complejos, visión estratégica. Inglés avanzado/bilingüe es casi imprescindible.
- **Ingeniero/a de Diseño (Especialidades: Civil, Estructural, Geotécnico, Eléctrico - Potencia/Protecciones/Control):** Equipo técnico responsable de traducir los conceptos en planos constructivos y especificaciones detalladas. Usualmente forma parte de la plantilla de la empresa EPC contratista o firmas de ingeniería especializadas.
 - *Responsabilidades Clave:* Realización de cálculos de diseño (estructural, eléctrico, geotécnico), elaboración de planos detallados para construcción, desarrollo de especificaciones técnicas para equipos y materiales, aseguramiento del cumplimiento de

- códigos nacionales (normativa UTE) e internacionales (IEC, IEEE, Eurocódigos, etc.), selección de tecnología y equipos principales. Uso intensivo de software especializado (CAD, GIS, análisis estructural, simulación de sistemas eléctricos como ETAP/DigSilent, software geotécnico).
- *Capacidades/Formación:* Titulación en Ingeniería de la especialidad requerida. Experiencia en diseño de proyectos similares. Dominio experto de herramientas de software de diseño y simulación. Conocimiento actualizado de normativas y estándares técnicos internacionales y locales. Capacidad de trabajo en equipos multidisciplinarios. Inglés técnico esencial.
 - **Especialista en Integración a Red:** Rol crítico que asegura la conexión viable y segura del parque a la red eléctrica nacional.
 - *Responsabilidades Clave:* Realización/supervisión de estudios eléctricos específicos para la conexión (flujo de potencia, cortocircuito, estabilidad, armónicos, calidad de onda), definición de requisitos técnicos para la subestación de interconexión y la línea de evacuación, coordinación técnica con el operador de la red (UTE), seguimiento del cumplimiento del código de red durante diseño y comisionado.
 - *Capacidades/Formación:* Ingeniería Eléctrica con fuerte especialización en Sistemas Eléctricos de Potencia. Experiencia en estudios de conexión a red y conocimiento profundo del código de red uruguayo y prácticas internacionales. Manejo de software de simulación de redes de potencia.

B. Logística Especializada (Mayormente Off-Site/Indirecto - Crítico para Viabilidad)

La logística de componentes mayores, especialmente para parques eólicos, es una operación compleja que requiere alta especialización, como se desprende del análisis de la cadena de valor (ej. IRENA, 2024, *Shaping sustainable hydrogen value chains* que, aunque enfocado en H2, discute infraestructura).

- **Planificador/a de Transporte Pesado y Cargas Especiales (Heavy Lift & Haulage):**
 - *Responsabilidades Clave:* Diseño de la estrategia logística completa para componentes sobredimensionados/extrapesados (palas, nacelles, secciones de torre, trafos principales). Incluye análisis y selección de rutas (marítimas, fluviales, terrestres), evaluación de puentes y carreteras, gestión de permisos especiales, contratación y supervisión de transportistas especializados, planificación de maniobras complejas.
 - *Capacidades/Formación:* Formación en Logística, Ingeniería o experiencia equivalente muy específica (>5-10 años) en transporte de cargas de proyecto ("Project Cargo"). Conocimiento detallado de normativa de transporte especial, equipos de transporte pesado (SPMTs, etc.) y grúas. Gran capacidad de planificación, gestión de riesgos y coordinación multi-actor.
- **Coordinador/a de Operaciones Portuarias y Aduanas:**
 - *Responsabilidades Clave:* Gestión de la interfaz entre el transporte marítimo/fluvial y el terrestre en el puerto de entrada. Coordinación con autoridades portuarias (ANP) y de Aduanas, gestión de documentación de importación/tránsito, contratación de servicios de estiba/desestiba, almacenamiento portuario temporal y carga sobre camiones especiales.

- **Capacidades/Formación:** Experiencia en operaciones portuarias, logística internacional y/o gestión aduanera. Conocimiento de procedimientos de importación, regímenes aduaneros y operativa portuaria en Uruguay. Habilidades de organización y comunicación.

C. Gestión, Supervisión e Ingeniería de Sitio (Ejecución en Terreno)

Este grupo lidera y soporta técnicamente la ejecución física del proyecto en el emplazamiento.

- **Gerente/Director/a de Proyecto (Sitio):** (Ver descripción detallada en texto anterior).
- **Jefe/a de Construcción o de Sitio:** (Ver descripción detallada en texto anterior).
- **Supervisor/a de Disciplina (Civil, Montaje Mecánico/Eólico, Montaje Eléctrico, I&C):** (Ver descripción detallada en texto anterior).
- **Capataz / Encargado/a de Cuadrilla:** (Ver descripción detallada en texto anterior).
- **Ingeniero/a de Campo (Civil, Eléctrico, Mecánico):** (Ver descripción detallada en texto anterior, añadir énfasis en resolución de RFIs y gestión de cambios menores en campo).
- **Topógrafo / Agrimensor:** (Ver descripción detallada en texto anterior, añadir posible uso de tecnologías como drones y LiDAR para levantamientos y control).
- **Ingeniero/a de Planificación y Control (Project Controls):**
 - **Rol:** Seguimiento y control del progreso físico y económico del proyecto.
 - **Responsabilidades Clave:** Desarrollo y mantenimiento detallado del cronograma maestro de construcción (usando software como Primavera P6 o MS Project); seguimiento semanal del avance físico por frente de trabajo; control de costos y análisis de desviaciones; gestión de cambios y reclamaciones; preparación de informes de progreso para la Gerencia.
 - **Capacidades/Formación:** Ingeniería (idealmente Industrial) o formación técnica con especialización certificada en planificación y control de proyectos. Dominio avanzado de software de planificación y herramientas de control de costos. Capacidad analítica, atención al detalle y habilidades de comunicación/reporte. Experiencia en proyectos de construcción.

D. Salud, Seguridad, Medio Ambiente (HSE) y Calidad (QA/QC) en Sitio

Funciones transversales y absolutamente críticas para el éxito y sostenibilidad del proyecto, enfatizadas en marcos como las directrices de Transición Justa de la OIT (*ILO, 2015*).

- **Gerente/Coordinador/a HSE de Sitio:**
 - **Rol:** Liderar y gestionar integralmente la Salud, Seguridad Ocupacional y Medio Ambiente (HSE) durante la fase de construcción del proyecto EERR en el sitio, asegurando el cumplimiento normativo y fomentando una cultura de seguridad proactiva.
 - **Responsabilidades Clave:** Desarrollar, implementar y supervisar el Plan de Gestión HSE específico del sitio, alineado con la legislación nacional (ej. Decretos de seguridad en construcción), los permisos ambientales/sociales y los estándares del proyecto/corporativos. Liderar la identificación de peligros y la evaluación de riesgos (IPERC) para todas las actividades constructivas, definiendo e implementando medidas de control efectivas, especialmente para trabajos de alto riesgo (altura, izaje, eléctricos, excavaciones, espacios confinados, etc.). Establecer y gestionar el sistema de Permisos de Trabajo (PTW). Planificar y ejecutar el programa de auditorías e inspecciones HSE periódicas en todos los frentes de

obra. Supervisar el desempeño HSE de todos los contratistas presentes en sitio, asegurando su cumplimiento de los requisitos del proyecto. Liderar la investigación de incidentes y accidentes, determinar causas raíz y asegurar la implementación de acciones correctivas/preventivas. Desarrollar, mantener y probar el Plan de Respuesta a Emergencias del sitio. Planificar y supervisar el programa de capacitación e inducción HSE para todo el personal (propio y contratista). Promover activamente la cultura de seguridad mediante campañas, reconocimientos y el liderazgo visible. Supervisar la correcta gestión ambiental en obra (manejo de residuos, control de derrames, protección de flora/fauna, control de polvo/ruido) según el Plan de Gestión Ambiental. Preparar informes periódicos de desempeño HSE para la Gerencia de Proyecto y, si aplica, para las autoridades. Mantener la interfaz con organismos de fiscalización (ej. MTSS, DINAMA/DINACEA).

- **Capacidades/Formación:** Titulación universitaria (Ingeniería -cualquier especialidad con orientación HSE-, Licenciatura en Seguridad y Salud Ocupacional, Técnico Prevencionista con experiencia significativa y formación adicional) o formación equivalente. Es altamente valorada la formación de posgrado o certificaciones internacionales en Gestión HSE (ej. NEBOSH IGC/Diploma, Master en PRL) y/o Gestión Ambiental (ej. ISO 14001 Lead Auditor). Experiencia demostrable y progresiva (generalmente >7-10 años) en roles de liderazgo HSE en grandes proyectos de construcción, preferentemente en el sector energético, industrial o de infraestructura. Conocimiento experto y actualizado de la legislación HSE uruguaya aplicable a la construcción. Experiencia comprobada en la implementación y auditoría de Sistemas de Gestión HSE (basados en ISO 45001 / 14001). Dominio de técnicas de identificación de peligros y evaluación de riesgos (HAZID, JSA/AST). Experiencia en investigación de incidentes (ej. ICAM, TapRoot). Fuertes habilidades de liderazgo, comunicación interpersonal y asertiva, capacidad de influencia y negociación. Habilidad para gestionar equipos HSE y contratistas. Capacidad de análisis y reporte. Inglés técnico es frecuentemente requerido.
- **Técnico/a Prevencionista / Oficial HSE:**
 - **Rol:** Ejecutar y supervisar directamente en terreno las actividades de prevención de riesgos laborales y cumplimiento ambiental, asegurando la implementación efectiva de los procedimientos y la cultura de seguridad durante la construcción. Rol regulado clave en Uruguay para la supervisión diaria.
 - **Responsabilidades Clave:** Realizar inspecciones de seguridad planificadas y no planificadas en los distintos frentes de trabajo, verificando el cumplimiento de procedimientos, el uso correcto de Equipos de Protección Personal (EPP), el estado de herramientas/equipos, y las condiciones generales de seguridad y orden. Verificar en campo y participar en la emisión/cierre de Permisos de Trabajo (PTW), especialmente para tareas críticas. Impartir charlas diarias de seguridad ("toolbox talks") y realizar inducciones HSE básicas a nuevos ingresos. Colaborar en la investigación de incidentes y cuasi-accidentes, recolectando información y evidencia en sitio. Verificar la implementación y efectividad de las medidas de control de riesgos identificadas. Supervisar directamente las actividades de contratistas en aspectos HSE. Fomentar activamente comportamientos seguros y corregir actos inseguros

observados. Realizar Observaciones Preventivas de Seguridad (OPS) o similares. Mantener registros HSE de campo (inspecciones realizadas, asistencia a charlas, incidentes menores). Actuar como primera respuesta ante emergencias menores, activar las alarmas y seguir los procedimientos del Plan de Emergencia. Supervisar aspectos básicos de gestión ambiental en obra (correcta segregación de residuos, uso de bandejas anti-derrame, etc.).

- **Capacidades/Formación:** Titulación habilitante como Técnico Prevencionista en Seguridad e Higiene en el Trabajo, registrada y vigente según la normativa uruguaya (ej., formación UTU, instituciones privadas habilitadas por MEC/MTSS). Experiencia previa (idealmente >1-2 años) trabajando como prevencionista en obras de construcción, preferentemente en proyectos industriales, energéticos o de infraestructura. Conocimiento sólido y práctico de la normativa de seguridad y salud en la construcción uruguaya (ej. Decreto 125/014 y relacionados). Capacidad para identificar peligros comunes y específicos de la construcción EERR (altura, eléctricos, mecánicos, etc.) y evaluar riesgos básicos en campo. Buenas habilidades de comunicación verbal para impartir charlas e interactuar con trabajadores de distintos niveles y contratistas. Capacidad de observación y registro sistemático. Firmeza y asertividad para hacer cumplir las normas de seguridad. Habilidad para trabajar en equipo con la supervisión de obra y otros prevencionistas. Aptitud física para recorrer la obra y trabajar en condiciones de campo.
- **Responsable / Inspector/a de Calidad (QA/QC):**
 - **Rol:** Asegurar, mediante la inspección, verificación y documentación, que todos los materiales, equipos, procesos constructivos y montajes realizados en el sitio cumplen con las especificaciones técnicas del proyecto, los planos de ingeniería aprobados, los códigos y normas aplicables, y el Plan de Calidad del proyecto.
 - **Responsabilidades Clave:** Implementar y ejecutar el Plan de Puntos de Inspección (PPI) o Inspection and Test Plan (ITP) definido para el proyecto, cubriendo las disciplinas relevantes (civil, mecánica, eléctrica, soldadura, recubrimientos, etc.). Realizar inspecciones de recepción de materiales y equipos críticos en obra, verificando certificados de calidad, conformidad con especificaciones y ausencia de daños. Verificar la correcta ejecución de trabajos de obra civil (ej., control de encofrados, armaduras, toma de muestras y ensayos de hormigón, topografía). Supervisar y/o realizar inspecciones de soldadura (inspección visual, verificación de calificación de soldadores/procedimientos, coordinación y revisión de Ensayos No Destructivos - NDT). Verificar el correcto montaje mecánico de estructuras y equipos (verticalidad, nivelación, torqueo de pernos). Inspeccionar la instalación eléctrica (cableado, conexiones, puesta a tierra, montaje de equipos) según planos y normativa. Supervisar o realizar pruebas funcionales y de conformidad de equipos y sistemas antes del comisionado. Verificar la correcta aplicación de recubrimientos y pinturas según especificación. Asegurar la calibración vigente de los equipos de medición y ensayo utilizados. Documentar todas las inspecciones y pruebas realizadas en los registros correspondientes. Emitir y gestionar Reportes de No Conformidad (RNC) cuando se detecten desviaciones, y verificar el cierre efectivo de las acciones correctivas/preventivas. Compilar y revisar los Dossiers de Calidad de los contratistas y preparar el Dossier final del proyecto.

- **Capacidades/Formación:** Formación técnica (Técnico en Construcción, Mecánica, Electricidad, Soldadura, Calidad) o Ingeniería (Civil, Mecánica, Eléctrica, Industrial, de Materiales). Experiencia demostrable y específica (>3-5 años, según nivel de responsabilidad) en roles de Inspección de Calidad (QA/QC) en proyectos de construcción industrial, energética o de infraestructura. Imprescindible capacidad para leer e interpretar planos de ingeniería complejos, especificaciones técnicas, procedimientos de inspección y códigos/normas internacionales y nacionales (ej., AWS D1.1, ASME B31.3/VIII, API, normas ISO 9001, normas IEC/IEEE, normativa UTE, UNIT). **Certificación vigente en técnicas de inspección específicas según la disciplina es altamente requerida/valorada:** por ejemplo, Inspector de Soldadura Certificado (CWI de AWS o equivalente), Inspector NDT Nivel II (según ISO 9712 o ASNT SNT-TC-1A) en técnicas como Ultrasonido (UT), Líquidos Penetrantes (PT), Partículas Magnéticas (MT), Radiografía Industrial (RT), Inspector de Recubrimientos (NACE CIP Nivel I/II o FROSIO), Inspector Eléctrico (basado en experiencia y conocimiento normativo), Inspector Civil (basado en experiencia). Metodología de trabajo rigurosa, atención extrema al detalle, capacidad de registro preciso y elaboración de informes técnicos claros. Habilidad para comunicarse eficazmente con los equipos de construcción/supervisión y para defender criterios técnicos de calidad.

E. Logística y Administración de Sitio

- **Responsable de Logística de Sitio / Materiales:**
 - **Rol:** Gestionar eficientemente la recepción, almacenamiento, control y distribución de todos los materiales, equipos y consumibles necesarios para la construcción dentro del sitio del proyecto EERR.
 - **Responsabilidades Clave:** Coordinar la recepción de materiales y equipos provenientes de proveedores y transporte externo. Verificar la conformidad de las entregas (cantidad, calidad aparente). Organizar y supervisar el almacenamiento seguro y ordenado de materiales en las áreas designadas del sitio (laydown areas), considerando requisitos especiales (ej. protección intemperie, manejo componentes delicados). Mantener un control de inventario preciso utilizando sistemas manuales o computarizados (CMMS/ERP si aplica). Coordinar la entrega oportuna de materiales a los diferentes frentes de trabajo según las solicitudes de los supervisores de construcción. Gestionar el almacén de herramientas y consumibles de la obra. Supervisar las operaciones de carga y descarga dentro del sitio. Optimizar el flujo de materiales para evitar cuellos de botella o daños. Mantener la comunicación con los equipos de compras y planificación para asegurar la disponibilidad de materiales. Gestionar la devolución o disposición final de materiales sobrantes o defectuosos.
 - **Capacidades/Formación:** Formación técnica en Logística, Administración o experiencia equivalente en gestión de almacenes/materiales en grandes obras de construcción o industria. Conocimiento de técnicas de gestión de inventarios y almacenamiento. Habilidad para operar (o supervisar operación de) equipos de manejo de materiales (montacargas, grúas pequeñas). Capacidad de organización, planificación y atención al detalle. Manejo de software de gestión de inventarios/ERP (deseable). Buenas habilidades de comunicación y coordinación. Conocimiento básico de seguridad en manejo de materiales.

- **Administrativo/a de Obra / Control Documental:**

- **Rol:** Proporcionar soporte administrativo integral en el sitio de construcción y gestionar el flujo y control de toda la documentación técnica y administrativa del proyecto.
- **Responsabilidades Clave:** Gestionar la recepción, registro, distribución y archivo de toda la documentación del proyecto (planos, especificaciones, informes, correspondencia, actas, etc.), utilizando preferentemente plataformas EDMS. Asegurar el control de versiones y la trazabilidad de los documentos. Administrar los recursos de oficina en sitio (suministros, equipos). Apoyar en la gestión de personal en obra (control de horas, coordinación de accesos, apoyo a RRHH). Asistir en la preparación de informes y presentaciones. Gestionar comunicaciones internas y externas (teléfono, correo). Apoyar en la coordinación logística menor (transporte de personal, reservas). Mantener registros administrativos y bases de datos actualizadas. Procesar documentación para pagos a proveedores/contratistas (si aplica). Asegurar la confidencialidad de la información sensible.
- **Capacidades/Formación:** Formación administrativa (Bachillerato, Tecnicatura en Administración - UTU/Privados) o experiencia equivalente. Experiencia previa en administración de obras de construcción es altamente valorada. Dominio avanzado de herramientas ofimáticas (Word, Excel, PowerPoint, Outlook). **Experiencia comprobable en el uso de Sistemas Electrónicos de Gestión Documental (EDMS)** como Aconex, SharePoint, etc. (fundamental). Excelentes habilidades de organización, atención al detalle y gestión del tiempo. Capacidad para trabajar en un entorno dinámico y manejar múltiples tareas. Buenas habilidades de comunicación escrita y verbal.

F. Oficios Calificados (Ejecución Directa - Núcleo del Empleo en Construcción)

Representan el mayor volumen de empleo directo en sitio y donde la formación técnica vocacional (identificada como clave en informes como el del *MTSS Uruguay, 2024* o el de *Accenture/ETI Australia*) es fundamental.

- **Operadores/as de Maquinaria Pesada y Grúas (Incluye Grúas de Alto Tonelaje):**

- **Rol:** Operar de manera segura y eficiente diferentes tipos de maquinaria pesada y grúas necesarias para las tareas de movimiento de tierras, excavación, transporte interno y montaje de componentes en la construcción de parques EERR.
- **Responsabilidades Clave:** Operar equipos como excavadoras, retroexcavadoras, motoniveladoras, bulldozers, cargadores frontales para preparación del sitio, apertura de caminos, excavación de zanjas y fundaciones. Operar grúas móviles (telescópicas, sobre orugas) de diversas capacidades para la descarga de materiales, montaje de estructuras (solares) y, críticamente, **el montaje de secciones de torre, nacelles y palas de aerogeneradores (requiriendo grúas de alto tonelaje >500t)**. Operar equipos de transporte interno en sitio (ej. dumpers). Realizar inspecciones pre-operacionales diarias del equipo asignado. Ejecutar las maniobras siguiendo las indicaciones de supervisores y riggers/eslingadores, asegurando la estabilidad de la carga y la seguridad del entorno.

Cumplir estrictamente las normas de seguridad para operación de maquinaria y maniobras de izaje. Realizar mantenimiento básico y limpieza del equipo.

- **Capacidades/Formación:** Educación media básica. **Licencia de conducir profesional habilitante** para el tipo de maquinaria a operar. **Certificación específica y vigente como operador de grúa**, especialmente para equipos de **alto tonelaje ($\geq 500t$)**, reconocida nacional o internacionalmente (INDISPENSABLE para eólica). Experiencia comprobable en la operación del tipo de equipo específico en obras de construcción/industriales. Conocimiento de técnicas de operación segura, tablas de carga (grúas), señales manuales de izaje. Atención, concentración y buena coordinación psicomotriz. Fuerte conciencia de seguridad
- **Oficiales de Obra Civil (Encofrador, Ferrallista, Albañil, Hormigonero):**
 - **Rol:** Realizar las tareas especializadas de obra civil necesarias para la construcción de fundaciones, estructuras de hormigón armado y otras infraestructuras del parque EERR.
 - **Responsabilidades Clave:**
- *Encofrador/a:* Montar y desmontar sistemas de encofrado (madera, metálicos) para fundaciones de aerogeneradores, bases de equipos, zapatas, muros, etc., siguiendo planos y especificaciones.
- *Ferrallista/Armador/a:* Cortar, doblar y armar las estructuras de acero corrugado (ferralla) según los planos de armado para elementos de hormigón.
- *Albañil:* Realizar trabajos de mampostería (levantamiento de muros, revoques), colocación de bloques, terminaciones civiles en edificios (subestación, control).
- *Hormigonero/a:* Participar en la recepción, vertido, vibrado y curado del hormigón para fundaciones y estructuras, asegurando la calidad del proceso.
- **Capacidades/Formación:** Educación media básica, preferiblemente con formación profesional específica (ej. **UTU Construcción Civil, cursos INEFOP**). Experiencia demostrable en el oficio correspondiente en obras de construcción civil o industrial. Capacidad para interpretar planos básicos de construcción/encofrado/armado. Habilidad en el uso de herramientas manuales y eléctricas propias del oficio. Conocimiento de técnicas constructivas y materiales (hormigón, acero, madera). Aptitud física para el trabajo en obra. Conocimiento y aplicación de normas de seguridad en construcción.
- **Montadores/as Mecánicos y Estructurales (Incluye Riggers/Eslingadores):**
 - **Rol:** Ensamblar e instalar estructuras metálicas (torres eólicas, soportes solares) y componentes mecánicos del parque EERR, incluyendo la preparación y ejecución segura de maniobras de izaje.
 - **Responsabilidades Clave:** Interpretar planos de montaje mecánico y estructural. Ensamblar secciones de torres eólicas o estructuras de soporte solar utilizando herramientas manuales y de potencia, asegurando alineación y torqueo correcto de pernos. Instalar componentes mecánicos (ej. sistemas de yaw/pitch en nacelles - básico). *Como Rigger/Eslingador:* Seleccionar y verificar elementos de izaje adecuados (eslingas, grilletes, estrobos) según peso y centro de gravedad de la carga. Preparar las cargas para el izaje, asegurando un eslingado correcto y equilibrado. Guiar al operador de grúa mediante señales manuales estandarizadas durante las maniobras. Asegurar la zona de izaje. Cumplir rigurosamente

procedimientos de seguridad para montaje, trabajo en altura, espacios confinados (nacelle) y maniobras de izaje críticas.

- **Capacidades/Formación:** Formación técnica (ej. **UTU Mecánica, Montaje Industrial, Estructuras Metálicas**) o experiencia equivalente comprobada. Habilidad para interpretar planos de montaje. Destreza en uso de herramientas manuales y de potencia (llaves de torque, etc.). **Certificación vigente y experiencia en trabajo seguro en altura (fundamental para eólica). Certificación y/o experiencia comprobada como Rigger/Eslingador** (conocimiento de tablas de carga, elementos de izaje, señales). Certificación en espacios confinados (deseable/requerida para eólica). Aptitud física. Fuerte conciencia de seguridad.
- **Técnicos de Montaje Eólico (Especializados):**
 - **Rol:** Ejecutar las tareas técnicas especializadas de montaje, ensamblaje y pre-comisionado de los aerogeneradores, integrando componentes mecánicos, eléctricos e hidráulicos.
 - **Responsabilidades Clave:** Participar en el montaje de las secciones de torre, la nacelle, el buje (hub) y las palas, siguiendo los procedimientos específicos del fabricante (OEM). Realizar el conexionado eléctrico interno de la nacelle y la torre (potencia, control, comunicaciones). Instalar y verificar sistemas hidráulicos (ej. sistema de pitch). Realizar el torqueo controlado de pernos críticos estructurales y de componentes mayores. Asistir en la instalación de sistemas de control y sensores. Realizar verificaciones y pruebas funcionales básicas pre-comisionado (ej. giro lento, pruebas de sistemas de seguridad básicos). Seguir estrictamente los manuales y procedimientos de montaje del fabricante. Trabajar en estrecha colaboración con equipos de grúas y supervisores. Cumplir con los más altos estándares de seguridad y calidad.
 - **Capacidades/Formación:** Formación técnica multi-disciplinar (Electromecánica, Mantenimiento Industrial, Energías Renovables - Nivel UTU/UTEC). **Formación específica y certificada por el fabricante del aerogenerador (OEM) o experiencia equivalente en montaje de turbinas eólicas es altamente deseable/requerida. Certificaciones GWO (BST y BTT) vigentes y completas son indispensables.** Habilidades eléctricas, mecánicas e hidráulicas combinadas. Capacidad para interpretar manuales técnicos complejos (a menudo en inglés). Destreza manual y precisión. **Excelentes habilidades de trabajo en altura y espacios confinados.** Aptitud física robusta. Fuerte orientación a la seguridad y calidad.
- **Instaladores/as de Módulos FV / Estructuras Solares:**
 - **Rol:** Realizar el montaje físico de las estructuras de soporte y la instalación de los módulos fotovoltaicos (FV) en grandes parques solares.
 - **Responsabilidades Clave:** Interpretar planos básicos de disposición de estructuras y módulos. Ensamblar las estructuras de soporte (fijas o seguidores/trackers) sobre las fundaciones preparadas, utilizando herramientas manuales y eléctricas. Instalar los módulos FV sobre las estructuras, asegurando la correcta fijación y conexionado eléctrico inicial (strings). Manejar los módulos FV con cuidado para evitar daños. Seguir procedimientos estandarizados para asegurar la productividad y calidad de la instalación. Trabajar en equipo para manejar componentes y cumplir con los ritmos de montaje. Cumplir con las normas de seguridad (manejo de materiales, trabajo a la intemperie).

- **Capacidades/Formación:** Educación media básica. **Se requiere entrenamiento específico en los procedimientos de montaje** de las estructuras y módulos utilizados en el proyecto para asegurar eficiencia y calidad. Habilidad manual y destreza en el uso de herramientas básicas (llaves, taladros, etc.). Capacidad para realizar tareas repetitivas de forma eficiente. Aptitud física para trabajar al aire libre y manejar componentes de cierto peso/tamaño. Conocimientos básicos de seguridad en construcción.
- **Soldadores/as Calificados (Estructural/Tubería):**
 - **Rol:** Realizar uniones soldadas de alta calidad en componentes estructurales (ej. soportes, secciones de torre si aplica diseño soldado) y/o tuberías (ej. en subestaciones, sistemas auxiliares) cumpliendo con los procedimientos y códigos aplicables.
 - **Responsabilidades Clave:** Interpretar planos y especificaciones de soldadura (WPS - Welding Procedure Specification). Preparar las superficies y juntas a soldar. Seleccionar y utilizar el proceso de soldadura adecuado (ej. SMAW, FCAW, GMAW) y los consumibles correctos. Ejecutar las soldaduras cumpliendo los parámetros del WPS y los requisitos de calidad (penetración, ausencia de defectos). Realizar inspección visual de las soldaduras propias. Colaborar con inspectores de calidad (QA/QC) para ensayos no destructivos (NDT). Cumplir estrictamente las normas de seguridad para trabajos de soldadura (protección personal, prevención de incendios, manejo de gases).
 - **Capacidades/Formación:** Formación profesional como soldador (ej. UTU, INEFOP). **Calificación vigente como soldador según códigos internacionales reconocidos (ej. AWS D1.1 para estructuras, ASME IX para tuberías/recipientes a presión)** en los procesos, posiciones y materiales requeridos por el proyecto (INDISPENSABLE). Experiencia comprobable en soldadura industrial/estructural. Habilidad para interpretar WPS y simbología de soldadura. Destreza manual y buena agudeza visual. Conocimiento de seguridad en soldadura.
- **Electricistas / Técnicos/as Eléctricos (Montaje BT/MT):**
 - **Rol:** Realizar la instalación, conexión y pruebas de los sistemas eléctricos de Baja Tensión (BT) y Media Tensión (MT) en los parques EERR y subestaciones asociadas.
 - **Responsabilidades Clave:** Interpretar planos y esquemas eléctricos unifilares y de conexión. Tender y conectar cables de potencia y control (BT/MT). Instalar bandejas portacables, ductos y otros soportes. Montar y conectar equipos eléctricos como tableros de distribución, centros de control de motores (CCMs), transformadores de MT/BT, celdas de MT, inversores (solar), equipos internos de aerogeneradores. Realizar conexiones (terminales, empalmes MT). Instalar sistemas de puesta a tierra. Realizar pruebas básicas de continuidad, aislamiento (megado) y secuencia de fases. Cumplir estrictamente la normativa eléctrica y de seguridad (Reglamento UTE, NFPA 70E - LOTO).
 - **Capacidades/Formación:** Formación técnica calificada (ej. **UTU Bachillerato Tecnológico o Tecnicatura en Electrotecnia/Electricidad Industrial**). **Habilitación vigente de UTE** para trabajos en instalaciones eléctricas (INDISPENSABLE, según categoría requerida). Experiencia comprobable en montaje eléctrico industrial, preferentemente en MT. Capacidad para interpretar planos eléctricos complejos. Conocimiento de materiales y

equipos eléctricos (cables, interruptores, transformadores, etc.). Habilidad en el uso de herramientas electricistas y equipos de medida (multímetro, megóhmetro). Fuerte conocimiento y aplicación de normas de seguridad eléctrica (LOTO, 5 reglas de oro).

- **Instrumentistas / Técnicos/as de Control (Montaje):**

- **Rol:** Instalar, conectar y verificar instrumentos de campo, válvulas de control y sistemas de control asociados en el parque EERR y subestación.
- **Responsabilidades Clave:** Interpretar diagramas P&ID, diagramas de lazo y planos de montaje de instrumentación. Instalar instrumentos de medición (sensores de T°, P, nivel, flujo, velocidad viento, irradiancia solar, etc.) y elementos finales de control (válvulas de control, actuadores). Instalar soportes y tubing neumático/hidráulico para instrumentos. Realizar el conexionado de señales de instrumentos a cajas de conexión y paneles de control (PLCs/RTUs). Realizar pruebas básicas de continuidad de lazos y verificación de señales. Asistir al equipo de comisionado en las pruebas funcionales. Cumplir normas de seguridad, especialmente en áreas clasificadas si aplica (ATEX) y conexionado de sistemas de seguridad.
- **Capacidades/Formación:** Formación técnica (ej. **UTU Instrumentación y Control, Electrónica, Automatización**). Experiencia en montaje de instrumentación industrial. Habilidad para interpretar diagramas de lazo y P&IDs. Precisión y prolijidad en el montaje y conexionado. Conocimiento de diferentes tipos de instrumentos y señales (4-20mA, HART, etc.). Conocimiento básico de PLCs/DCS. Habilidad en uso de herramientas de instrumentista y calibradores básicos. Conocimiento de seguridad eléctrica y trabajo en áreas ATEX (si aplica).

- **Empalmadores/as / Técnicos/as de Fibra Óptica:**

- **Rol:** Instalar, empalmar, probar y certificar la red de fibra óptica utilizada para las comunicaciones y el sistema SCADA del parque EERR.
- **Responsabilidades Clave:** Tender cable de fibra óptica (aéreo, subterráneo, interior) siguiendo planos y respetando radios de curvatura. Preparar los extremos de la fibra para el empalme. Realizar empalmes por fusión de alta calidad y baja atenuación. Instalar conectores y paneles de parcheo. Realizar mediciones y pruebas de la red de fibra óptica utilizando equipos especializados (OTDR, medidor de potencia óptica) para verificar la integridad y certificar el rendimiento según estándares. Diagnosticar y reparar fallos en la red de fibra. Documentar la red instalada y los resultados de las pruebas.
- **Capacidades/Formación:** Formación técnica en Telecomunicaciones, Electrónica o Redes, con **especialización y/o certificación específica en instalación y empalme de fibra óptica**. Experiencia comprobable en trabajos similares. Destreza manual y precisión para el manejo de fibras y equipos de empalme/medición. Conocimiento de estándares de fibra óptica y técnicas de prueba (OTDR). Capacidad para interpretar planos de red.

- **Personal de Servicios Auxiliares (Aislamiento, Pintura, Andamios):**

- **Rol:** Realizar tareas de oficios auxiliares necesarios para la construcción y acabado de las instalaciones del parque EERR.
- **Responsabilidades Clave:**

- *Aislamiento*: Instalar aislamiento térmico/acústico en tuberías, equipos o edificios según especificaciones.
- *Pintura*: Preparar superficies y aplicar recubrimientos protectores/pintura en estructuras metálicas, equipos o edificios según esquemas definidos.
- *Andamios*: Montar, modificar y desmontar andamios seguros y conformes a normativa para permitir el acceso a trabajos en altura.
 - **Capacidades/Formación**: Formación profesional o experiencia comprobable en el oficio específico (aislador, pintor industrial, andamista). **Certificación vigente como Montador de Andamios (andamista certificado)** es un requisito de seguridad indispensable para ese rol. Conocimiento de materiales y técnicas propias del oficio. Conocimiento y aplicación de normas de seguridad asociadas a cada tarea (ej. manejo de pinturas/solventes, seguridad en montaje/uso de andamios, trabajo en altura).

G. Personal de Comisionado y Puesta en Marcha (Fase Final en Sitio)

- **Ingeniero/a de Comisionado (Eléctrico, Mecánico, I&C, SCADA):**
 - **Rol**: Liderar y supervisar la fase final de verificación, pruebas y puesta en marcha segura de los sistemas y equipos eléctricos, mecánicos, de instrumentación y control (I&C), y SCADA del proyecto, asegurando que funcionan según las especificaciones de diseño antes de la entrega a operación. Actúa como puente clave entre la fase de construcción y la de operación.
 - **Responsabilidades Clave**: Desarrollar, revisar y ejecutar planes y procedimientos detallados de comisionado para cada disciplina (Eléctrica, Mecánica, I&C, SCADA). Supervisar y validar la correcta ejecución de pruebas funcionales, pruebas de rendimiento (PTRs), calibraciones y verificaciones de la instalación contra los documentos de ingeniería (P&IDs, diagramas unifilares, lógicos, etc.). Coordinar y dirigir equipos multidisciplinarios de técnicos de comisionado y personal de construcción/contratistas durante las actividades de prueba. Diagnosticar y liderar la resolución de problemas técnicos complejos que surjan durante las fases de prueba y arranque inicial. Gestionar la documentación del comisionado, incluyendo registros de pruebas, listas de pendientes (punch lists), certificados de conformidad y el paquete de entrega final a operaciones. Asegurar el cumplimiento estricto de los protocolos de seguridad (Permisos de Trabajo, LOTO, análisis de riesgos específicos) durante todas las actividades de comisionado, fase considerada de alto riesgo, especialmente en plantas con H₂, NH₃, MeOH o Alta Tensión. Verificar la correcta implementación y funcionalidad de los Sistemas Instrumentados de Seguridad (SIS) y paradas de emergencia (ESD) antes de la introducción de fluidos peligrosos. Gestionar la interfaz y comunicación con proveedores de equipos (para pruebas específicas), la empresa EPC, el equipo de ingeniería y el futuro equipo de operaciones. Supervisar y aprobar las secuencias de puesta en marcha, incluyendo purgados, inertización, pruebas de fugas (ej. Helio para H₂), introducción controlada de fluidos de proceso y estabilización operativa inicial.
 - **Capacidades/Formación**: Titulación universitaria en Ingeniería (Eléctrica, Mecánica, Química, Electrónica, Automatización o afín). Experiencia demostrable significativa (generalmente >5-7 años) en comisionado y puesta en marcha de plantas industriales complejas (preferiblemente

en sector energía, químico, O&G, EERR). Profundo conocimiento técnico de los sistemas y equipos bajo su responsabilidad (ej., equipos AT/MT, transformadores, generadores, compresores, bombas, sistemas de control DCS/PLC/SCADA, instrumentación de proceso, SIS). Fuertes habilidades de liderazgo, planificación, organización y resolución de problemas complejos. Capacidad para trabajar bajo presión y gestionar múltiples actividades simultáneamente. Conocimiento de normativas y estándares internacionales relevantes (IEC, IEEE, ASME, API, ISO). Alto dominio de procedimientos de seguridad industrial (PSM deseable) y permisos de trabajo. Dominio de inglés técnico (lectura de manuales, comunicación con proveedores).

- **Técnico/a de Comisionado:**

- **Rol:** Ejecutar las actividades prácticas de prueba, verificación y ajuste de equipos y sistemas durante la fase de comisionado, bajo la supervisión del Ingeniero/a de Comisionado, asegurando la correcta funcionalidad y registro de resultados.
- **Responsabilidades Clave:** Ejecutar procedimientos de prueba específicos: realizar chequeos de lazos de control (loop checks), pruebas funcionales de instrumentos y equipos (motores, válvulas), calibración de instrumentos (presión, temperatura, nivel, flujo, analizadores). Utilizar equipos de prueba especializados: multímetros, calibradores de proceso, megóhmetros, equipos de prueba de relés (si aplica), analizadores de vibraciones, cámaras termográficas, detectores de fugas (ej. Helio), trazadores de curvas I-V (en solar). Instalar y conectar instrumentación temporal o equipos de prueba necesarios para las verificaciones. Registrar de manera precisa y detallada todos los resultados de las pruebas y las actividades realizadas en los formatos y sistemas establecidos. Identificar y diagnosticar fallos o desviaciones en equipos e instrumentos durante las pruebas, reportándolos al supervisor. Realizar ajustes y reparaciones menores según indicaciones y procedimientos aprobados. Asistir en las secuencias de arranque de sistemas y equipos, realizando verificaciones locales. Preparar equipos para pruebas (ej. aislamiento eléctrico/mecánico básico, verificación de limpieza/purga). Cumplir rigurosamente todos los procedimientos de seguridad aplicables (LOTO, PTW, uso de EPP).
- **Capacidades/Formación:** Formación técnica (Educación Media Tecnológica, Tecnicatura o Tecnólogo – ej. UTU/UTEC) en Electricidad, Electromecánica, Instrumentación, Automatización, Mantenimiento Industrial o similar. Experiencia práctica comprobable (generalmente >3-5 años) en mantenimiento industrial, montaje E&I, control de calidad en construcción, o idealmente en actividades de comisionado/puesta en marcha. **Habilidades avanzadas de diagnóstico y troubleshooting** de sistemas eléctricos, mecánicos y/o de control. **Destreza y experiencia en el uso de una amplia gama de equipos de prueba y medida.** Capacidad para leer e interpretar planos y diagramas técnicos (P&IDs, unifilares, de lazo, esquemas eléctricos). Atención meticulosa al detalle y precisión en la ejecución y registro de tareas. Conocimiento y aplicación de normas de seguridad industrial. Certificaciones de seguridad específicas (trabajo en altura, riesgo eléctrico, ATEX, manejo seguro H₂/NH₃/MeOH si aplica a la planta) son un plus o pueden ser requeridas. Aptitud

física para el trabajo en campo, que puede incluir altura, espacios confinados o condiciones climáticas variables.

H. Obreros/as Generales y Ayudantes

- **Rol:** Soporte esencial y potencial vía de entrada al sector.
- **Responsabilidades Clave:** Asistir a los oficiales y técnicos en tareas como transporte manual de materiales, preparación de herramientas, limpieza de áreas de trabajo. Realizar tareas de excavación manual menor, relleno, limpieza de zanjas. Mantener el orden y la limpieza general de la obra (housekeeping). Colaborar en tareas de señalización y vallado. Apoyar en tareas logísticas menores en sitio. Cumplir estrictamente todas las indicaciones de seguridad. Participar activamente en las charlas de seguridad.
- **Capacidades/Formación:** Educación básica. No se requiere experiencia previa específica, pero sí disposición para el trabajo físico y seguimiento de instrucciones. **Formación inicial obligatoria en seguridad básica en construcción (inducción HSE)** es primordial antes de iniciar tareas. Capacidad de trabajo en equipo. Aptitud física. Potencial para capacitación posterior en oficios específicos.

Perfiles Ocupacionales Para Operación, Mantenimiento (O&M) Y Gestión De Activos De EERR (Eólica Y Solar)

La operación exitosa a largo plazo de los activos de generación EERR (aprox. 18.8 GW) es tan crítica como su construcción. Esta fase asegura la producción de energía limpia, la rentabilidad de la inversión y la creación de **empleo estable y cualificado**, a menudo en zonas regionales donde se ubican los parques (IRENA & ILO, 2024; CEC *Skilling the Energy Transition*, 2022). La gestión moderna de estos activos va más allá del mantenimiento reactivo, incorporando estrategias proactivas, gestión de datos avanzada y optimización continua del rendimiento, tal como se describe en guías de referencia (NREL/Sandia *O&M Best Practices*, 2018; *SolarPower Europe O&M Guidelines V5.0*). La digitalización es un habilitador clave, demandando nuevas competencias transversales (ETIPs Report, 2024; JSQI *Skills for Engineers*, 2023).

A. Gestión de Activos y Supervisión Centralizada (Asset Management & Central Supervision)

Este nivel se enfoca en la supervisión estratégica, la optimización del rendimiento y la maximización del valor económico del portafolio de activos EERR.

- **Gerente de Activos (Asset Manager) EERR:**
 - **Rol:** Responsable de la gestión integral y estratégica del portafolio de parques EERR para alcanzar los objetivos financieros y operativos de los propietarios/inversores.
 - **Responsabilidades Clave:** Definir y supervisar la implementación de la estrategia de O&M; gestionar el rendimiento financiero (P&L) de los activos; liderar la relación con stakeholders clave (inversores, bancos, aseguradoras, UTE, reguladores); supervisar el cumplimiento de los contratos principales (PPA, O&M, seguros, terrenos, financiación); identificar y gestionar riesgos (operativos, de mercado, regulatorios, financieros); desarrollar y controlar

presupuestos (OPEX y CAPEX de mantenimiento mayor); evaluar y proponer optimizaciones, repotenciaciones o estrategias de fin de vida útil; asegurar el cumplimiento normativo y de permisos a largo plazo; liderar el equipo de gestión de activos.

- *Capacidades/Formación:* Titulación superior (Ingeniería con fuerte componente de gestión/finanzas, Administración de Empresas, Economía). Experiencia relevante (>7-10 años) en gestión de activos de infraestructura, idealmente energía renovable. Comprensión profunda de aspectos técnicos, financieros, contractuales y regulatorios del sector. Habilidades de liderazgo estratégico, análisis financiero avanzado, gestión de riesgos y negociación. Dominio de herramientas de gestión financiera y de activos. Inglés de negocios fluido.

- **Ingeniero/a de Rendimiento / Analista de Datos EERR (Performance Engineer/Data Analyst):**

- *Rol:* Experto/a técnico-analítico enfocado en monitorear, analizar y optimizar el rendimiento energético de los parques.
- *Responsabilidades Clave:* Análisis continuo y profundo de datos operativos (SCADA), meteorológicos, de mantenimiento (CMMS) y de inspecciones; cálculo y seguimiento riguroso de KPIs clave (Disponibilidad basada en tiempo y energía, Performance Ratio (PR) según IEC 61724, pérdidas por diversas causas, estado de salud de componentes); desarrollo y aplicación de modelos analíticos para detectar bajo rendimiento, predecir fallos (mantenimiento predictivo - PdM) y cuantificar impactos; evaluación técnica de la efectividad de acciones de O&M y propuesta de mejoras operativas o tecnológicas; generación de informes técnicos detallados y recomendaciones para Asset Management y O&M. Uso de herramientas digitales avanzadas es fundamental (*ETIPs Report, 2024*).
- *Capacidades/Formación:* Titulación en Ingeniería (Eléctrica, Mecánica, Industrial, Energías Renovables) o Ciencias (Física, Matemáticas, Estadística, Data Science). Experiencia demostrable en análisis de rendimiento de plantas EERR o análisis de datos complejos. Dominio avanzado de SCADA, CMMS, bases de datos (SQL), herramientas de análisis y visualización (Python/R, MATLAB, Power BI, Tableau). Conocimientos sólidos de estadística, modelado, machine learning (deseable). Comprensión física de la operación de aerogeneradores y plantas FV. Habilidad para comunicar hallazgos técnicos complejos.

- **Gestor/a de Contratos (PPA, O&M, Seguros, etc.):**

- *Rol:* Administra y asegura el cumplimiento de las obligaciones contractuales clave durante la fase operativa.
- *Responsabilidades Clave:* Gestión detallada del ciclo de vida de los contratos: seguimiento de cumplimiento de obligaciones (ej. disponibilidad garantizada en contrato O&M, entrega de energía en PPA); administración de mecanismos de incentivo/penalización; gestión de garantías de equipos principales; administración de pólizas de seguro (renovaciones, gestión de siniestros); seguimiento de contratos de arrendamiento/servidumbres; soporte en la resolución de disputas contractuales; preparación de licitaciones o renegociaciones de servicios O&M.

- *Capacidades/Formación:* Formación en Derecho, Administración o Ingeniería con fuerte componente legal/contractual. Experiencia (>3-5 años) en administración de contratos en sector energía o industrial. Atención extrema al detalle, capacidad de interpretación contractual, habilidades de negociación y gestión documental rigurosa.

B. Operaciones y Monitoreo

Equipo responsable de la supervisión en tiempo real y la operación remota segura de los parques.

- **Operador/a de Centro de Control (Remoto/Centralizado):**

- *Rol:* Ojos y oídos del parque 24/7, primera línea de respuesta operativa.
- *Responsabilidades Clave:* Monitoreo activo de estado, alarmas y rendimiento a través de SCADA; coordinación directa y cumplimiento de instrucciones del Despacho de Carga (UTE); ejecución segura de maniobras remotas (arranque/parada, cambios de consigna); registro detallado de eventos (logbook); primera evaluación y categorización de incidencias; comunicación y coordinación con técnicos de campo para mantenimientos correctivos o inspecciones.
- *Capacidades/Formación:* Formación técnica (Electricidad, Electrónica, Control, Informática - UTU o similar). Experiencia en operación de salas de control SCADA (idealmente energía/procesos). Comprensión de diagramas unifilares y lógicos. Capacidad de trabajo bajo presión, seguimiento estricto de procedimientos, comunicación clara. Disponibilidad para turnos.

- **Especialista SCADA / Comunicaciones / Ciberseguridad OT:**

- *Rol:* Asegura la disponibilidad, integridad y seguridad de la infraestructura digital operativa.
- *Responsabilidades Clave:* Mantenimiento preventivo y correctivo de servidores SCADA, redes de comunicación (fibra, radio), RTUs, bases de datos; gestión de actualizaciones y parches de seguridad; implementación y monitoreo de políticas de ciberseguridad para Tecnología Operacional (OT) conforme a estándares (ej. IEC 62443); gestión de accesos remotos seguros; troubleshooting avanzado de problemas de comunicación o adquisición de datos; gestión de backups y planes de recuperación ante desastres para sistemas OT. La ciberseguridad OT es una capacidad cada vez más crítica (*ETIPs Report, 2024*).
- *Capacidades/Formación:* Formación técnica superior o Ingeniería (Informática, Telecomunicaciones, Automatización). Experiencia sólida en sistemas SCADA/HMI y redes industriales (TCP/IP, Modbus, DNP3, IEC 61850/60870). Conocimientos demostrables y actualizados en ciberseguridad OT (firewalls industriales, segmentación, IDS/IPS, gestión de vulnerabilidades). Certificaciones relevantes (ej. GICSP, ISA/IEC 62443) son un plus.

C. Mantenimiento de Campo - Eólico

El personal de campo es esencial para la disponibilidad física de las turbinas, requiriendo alta especialización técnica y física, y un compromiso total con la seguridad (*GWO* como estándar mínimo).

- **Técnico/a de Mantenimiento Eólico (Niveles I, II, III - Multi-skilled):**

- *Rol:* Ejecuta el mantenimiento en las turbinas. La progresión (Nivel I a III) implica mayor autonomía, capacidad de diagnóstico y liderazgo técnico.
- *Responsabilidades Clave:* Realización de mantenimientos preventivos periódicos (listas de chequeo exhaustivas, inspecciones visuales y con herramientas -endoscopios-, lubricación programada, cambio de filtros, torqueo de pernos críticos); mantenimiento predictivo (toma de muestras de aceite, mediciones de vibraciones, termografía); diagnóstico y reparación de fallos eléctricos (sensores, contactores, cableado, convertidor de potencia, generador), mecánicos (rodamientos, frenos, multiplicadora -ajustes y reparaciones menores-) e hidráulicos (sistema de pitch); reemplazo de componentes; asistencia en grandes correctivos; uso riguroso de CMMS para gestión de OT y reporte.
- *Capacidades/Formación:* Formación técnica calificada (UTU o similar en Mecánica, Electricidad, Electromecánica, Mantenimiento Industrial, o específica en Eólica). **Certificaciones GWO completas y vigentes OBLIGATORIAS.** Experiencia progresiva (Nivel I <2 años, Nivel II 2-5 años, Nivel III >5 años con capacidad de liderar tareas complejas). Aptitud física y mental para trabajo en altura y espacios confinados. Interpretación de manuales técnicos complejos (inglés). Habilidades multidisciplinares crecientes con el nivel. Carnet de conducir. Licencia de operador de plataforma elevadora (PEMPs/PTAs).

- **Técnico/a Especialista en Palas:**

- *Rol:* Experto en la integridad y aerodinámica de las palas.
- *Responsabilidades Clave:* Planificación y ejecución de campañas de inspección avanzadas (drones con cámaras HD/IR/UV, acceso por cuerdas/plataformas); diagnóstico preciso de daños (uso de ultrasonido u otras técnicas NDT si aplica); ejecución de reparaciones complejas de materiales compuestos según procedimientos certificados; aplicación/mantenimiento de sistemas de protección de borde de ataque (LEP).
- *Capacidades/Formación:* Formación técnica con especialización certificada en materiales compuestos. Certificaciones avanzadas de acceso (IRATA/SPRAT Nivel 2 o 3). Experiencia específica (>3-5 años) en inspección y reparación de palas de diferentes fabricantes/modelos. Meticulosidad extrema.

- **Técnico/a de Alta Tensión (Subestación/Línea):**

- *Rol:* Mantenedor especializado de la infraestructura de evacuación eléctrica.
- *Responsabilidades Clave:* Ejecución de planes de mantenimiento detallados para equipos de patio AT/MT (pruebas funcionales de interruptores, análisis de gases disueltos en aceite -DGA-, termografía de conexiones, limpieza de aisladores); pruebas periódicas de relés de protección con equipos especializados; mantenimiento de sistemas de control y servicios auxiliares de la subestación; inspección de líneas; ejecución segura de maniobras de operación y consignación (LOTO en AT/MT).
- *Capacidades/Formación:* Formación técnica superior (UTU Electrotecnia, Ing. Tecnológica). Experiencia profunda (>5-7 años) en O&M de subestaciones AT/MT. **Habilitación UTE vigente**

para trabajos y maniobras en AT/MT. Conocimiento experto de equipos de potencia, esquemas de protección y control, y procedimientos de seguridad críticos para AT/MT.

D. Mantenimiento de Campo - Solar

Enfocado en mantener la eficiencia de conversión y la integridad del vasto número de componentes, siguiendo buenas prácticas (*NREL/Sandia, SolarPower Europe O&M V5.0*).

- **Técnico/a de Mantenimiento Solar / Electricista FV:**

- *Rol:* Primera línea de mantenimiento preventivo y correctivo en plantas solares. Perfil con alta demanda potencial en escenarios de gran despliegue (*SolarPower Europe Jobs Report, 2023*).
- *Responsabilidades Clave:* Inspecciones programadas (módulos - visual/IR/EL/UV-, estructuras, trackers, cableado, cajas); limpieza sistemática de módulos; ejecución de mantenimiento preventivo en inversores (limpieza filtros, revisión conexiones/ventiladores) y transformadores MT; diagnóstico de bajo rendimiento a nivel de string/inversor (uso de trazadores de curvas I-V, termografía); localización y reparación de fallos eléctricos DC/AC (módulos defectuosos, conectores, cableado, fusibles, protecciones); mantenimiento mecánico/eléctrico de sistemas de seguimiento (trackers); registro en CMMS.
- *Capacidades/Formación:* Formación técnica (UTU Electricidad, Electrónica, Energías Renovables). Experiencia en mantenimiento eléctrico industrial, idealmente FV. Conocimiento específico de inversores (diagnóstico, reemplazo de componentes/unidades), módulos FV, trackers. Habilidad en uso de equipos de medida (multímetro, pinza amperimétrica, megóhmetro, trazador I-V, cámara IR). Seguridad eléctrica (BT/MT). Carnet de conducir.

- **Equipo de Limpieza de Módulos / Control de Vegetación:**

- *Rol:* Ejecuta tareas esenciales para mantener el rendimiento y la seguridad del sitio.
- *Responsabilidades Clave:* Limpieza periódica de módulos FV utilizando métodos apropiados (manual, semi robotizado, robotizado) según plan y condiciones de suciedad (soiling); control efectivo de la vegetación en todo el sitio para evitar sombras, daños físicos y riesgos de incendio, usando métodos mecánicos o herbicidas controlados.
- *Capacidades/Formación:* No requiere alta cualificación técnica inicial, pero sí entrenamiento en los métodos de limpieza (cuidado con los módulos) y manejo seguro de maquinaria de desbroce/corte. Eficiencia y trabajo sistemático.

E. Soporte Técnico y HSE en O&M

- **Ingeniero/a de Sitio / Soporte Técnico O&M (Fiabilidad):**

- *Rol:* Proporciona análisis técnico profundo para mejorar la fiabilidad y eficiencia del O&M.
- *Responsabilidades Clave:* Realización de análisis de causa raíz (RCA) para fallos importantes; implementación de técnicas de Mantenimiento Centrado en Fiabilidad (RCM); análisis de datos de CMMS para optimizar planes preventivos/predictivos; gestión de obsolescencia y

propuestas de mejoras/reemplazos basados en análisis técnico-económico; soporte técnico avanzado a equipos de campo; evaluación de nuevas tecnologías de O&M (drones, sensores, IA).

- *Capacidades/Formación:* Titulación en Ingeniería (Mecánica, Eléctrica, Fiabilidad). Experiencia en O&M industrial, ingeniería de fiabilidad o mantenimiento predictivo. Capacidad analítica avanzada, conocimiento de técnicas RCA/RCM/FMEA.
- **Coordinador/a HSE (O&M):**
 - *Rol:* Vela por la seguridad y el cumplimiento ambiental durante la operación.
 - *Responsabilidades Clave:* Adaptación e implementación continua del sistema de gestión HSE a la fase operativa; desarrollo y auditoría de procedimientos de trabajo seguro para O&M (LOTO, trabajos eléctricos, manejo de químicos/aceites, respuesta a emergencias); gestión de la seguridad de contratistas de O&M; seguimiento de indicadores HSE; aseguramiento del cumplimiento de permisos ambientales operativos.
 - *Capacidades/Formación:* Titulación habilitante (Téc. Prevencionista, etc.). Experiencia en HSE industrial/energético, idealmente en O&M. Conocimiento de riesgos específicos de mantenimiento y operación EERR.

F. Administración y Logística de O&M

- **Administrativo/a de Sitio / Coordinador/a de Repuestos y Logística O&M:**
 - *Rol:* Gestiona el soporte administrativo y el flujo de materiales para O&M.
 - *Responsabilidades Clave:* Administración de personal de sitio; gestión optimizada del almacén de repuestos críticos y consumibles (definición de niveles de stock, control de inventario en CMMS/ERP, recepción/despacho); tramitación y seguimiento de órdenes de compra/servicio para O&M; coordinación logística para envío/recepción de componentes a reparar; mantenimiento de registros y documentación O&M (historiales de equipos, reportes).
 - *Capacidades/Formación:* Formación administrativa/logística. Experiencia en gestión de almacenes técnicos e inventarios. Manejo fluido de CMMS/ERP. Planificación y organización

Perfiles Ocupacionales para Construcción y Operación De Plantas de Electrólisis (Incl. Sistemas Auxiliares Y Potencial I+D+I)

La instalación de **9 GW de capacidad de electrólisis** para producir H₂V es el núcleo de la transformación industrial propuesta. Aunque los equipos principales (electrolizadores) no se fabriquen localmente, su **construcción, montaje, integración con el Balance de Planta (BoP), comisionado, operación y mantenimiento** demandarán competencias específicas, muchas de las cuales son críticas debido a la naturaleza del hidrógeno (*GIZ/DP Uruguay Report, 2024; Queensland Hydrogen Roadmap*). Esta sección detalla los perfiles necesarios, comenzando por la fase de ejecución del proyecto.

A. Perfiles para Construcción, Montaje y Puesta en Marcha de Plantas de Electrólisis

La construcción de los 9 GW de capacidad de electrólisis es una tarea de gran escala que requiere una combinación de conocimientos de ingeniería de procesos, manejo experto de gases (especialmente hidrógeno) y prácticas de construcción industrial rigurosas. Esta fase abarca desde la ingeniería de detalle hasta las pruebas finales y la entrega a operaciones. La seguridad inherente al hidrógeno es el eje transversal crítico en todas las etapas y perfiles (*GIZ/DP Uruguay Report, 2024; Queensland Hydrogen Roadmap*).

A.1. Desarrollo e Ingeniería Temprana (Pre-Construcción)

Esta fase define las bases técnicas y de viabilidad del proyecto de electrólisis.

- **Ingeniero/a de Desarrollo H2V / Líder Técnico Temprano:**
 - *Rol:* Lidera la definición técnica inicial del proyecto de electrólisis.
 - *Responsabilidades Clave:* Selección de tecnología de electrólisis (PEM, Alcalina, SOEC, AEM) basada en análisis técnico-económico y perfil operativo esperado; definición de balances de masa y energía preliminares; estudios de viabilidad técnica; especificación conceptual de sistemas principales (electrolizador, tratamiento agua, purificación H2, compresión); análisis de interfaces con suministro de EERR y demanda de H2; evaluación inicial de riesgos (HAZID).
 - *Capacidades/Formación:* Ingeniería Química, Mecánica o Eléctrica con experiencia sólida (>5-7 años) en tecnologías de hidrógeno, procesos químicos o electroquímicos. Visión global de la cadena de valor. Capacidad de análisis técnico-económico. Inglés avanzado.
- **Especialista en Recursos Hídricos / Tratamiento de Agua:**
 - *Rol:* Evalúa la disponibilidad y calidad del agua fuente y define el esquema de tratamiento necesario.
 - *Responsabilidades Clave:* Análisis de fuentes de agua dulce disponibles (ríos, acuíferos) cerca de los polos de producción H2 (Noroeste); caracterización físico-química del agua bruta; diseño conceptual y evaluación de tecnologías de purificación (pretratamiento, ósmosis inversa - RO, electrodesionización - EDI) para alcanzar la calidad de agua ultrapura requerida por los electrolizadores (especialmente PEM); estimación de consumos de agua y generación de efluentes; evaluación de opciones de reutilización/vertido.
 - *Capacidades/Formación:* Ingeniería Química, Civil (Hidráulica/Sanitaria) o Ambiental, con especialización y experiencia (>5 años) en tratamiento de aguas para uso industrial de alta pureza. Conocimiento de tecnologías RO/EDI.

A.2. Ingeniería de Detalle y Compras (EPC - Off-Site/Indirecto)

Fase intensiva en ingeniería donde se generan todos los documentos para construcción y se adquieren los equipos críticos.

- **Ingeniero/a de Procesos (H2V - Detalle):**
 - *Rol:* Desarrolla la ingeniería de proceso detallada del Balance de Planta (BoP).

- *Responsabilidades Clave:* Elaboración de P&IDs finales; balances de masa y energía detallados bajo diferentes escenarios operativos; dimensionamiento y especificación técnica completa de todos los equipos del BoP (separadores, secadores PSA/TSA, compresores H₂ - definiendo etapas y tipo, intercambiadores de calor, sistemas de refrigeración); diseño detallado de sistemas de seguridad de proceso (válvulas de alivio - PSV, discos de ruptura, sistemas de venteo seguro de H₂/O₂, sistemas de inertización/purga); participación activa y seguimiento de análisis HAZOP detallados; definición de la filosofía de control.
- *Capacidades/Formación:* Ingeniería Química. Experiencia (>5 años) en diseño de detalle de plantas de proceso/gas, idealmente con H₂. Dominio de software de simulación (Aspen HYSYS/Plus) y herramientas de diseño de procesos. Conocimiento experto de normas de seguridad de procesos (IEC 61511 para SIS).

- **Ingeniero/a de Tuberías (Piping - H₂ Service):**

- *Rol:* Diseña la red de tuberías garantizando integridad y seguridad para el servicio con hidrógeno.
- *Responsabilidades Clave:* Diseño detallado de layout de tuberías (piping routing) en modelo 3D; selección de materiales específicos para servicio con H₂ según presión, temperatura y pureza (aceros inoxidables austeníticos, aleaciones especiales si aplica), considerando normativas como ASME B31.12; cálculo y especificación de espesores, bridas, válvulas y accesorios; realización de análisis de flexibilidad y estrés (software CAESAR II o similar) para líneas críticas (alta presión, alta/baja temperatura); diseño de soportes; generación de planos isométricos para prefabricación y montaje.
- *Capacidades/Formación:* Ingeniería Mecánica/Industrial con especialización y experiencia sólida (>5-7 años) en diseño de piping para plantas de proceso/gas/refinería. Conocimiento experto de códigos (ASME B31.3, B31.12), materiales y análisis de estrés. Dominio de software de diseño 3D (PDS, SP3D, CADWorx).

- **Ingeniero/a Civil/Estructural/Geotécnico (Planta H₂):**

- *Rol:* Diseña las fundaciones y estructuras para soportar los equipos de electrólisis y BoP.
- *Responsabilidades Clave:* Diseño detallado de fundaciones para electrolizadores modulares, compresores (considerando cargas dinámicas/vibraciones), recipientes a presión (tanques H₂), skids de purificación, edificios (sala eléctrica, sala de control, taller); diseño de estructuras metálicas de soporte (pipe racks); diseño de sistemas de drenaje y contención de derrames.
- *Capacidades/Formación:* Ingeniería Civil con especialización Estructural y/o Geotécnica. Experiencia en diseño de fundaciones para equipos industriales pesados y vibratorios. Manejo de software de análisis estructural y geotécnico.

- **Ingeniero/a Eléctrico (Potencia/DC):**

- *Rol:* Diseña la alimentación eléctrica de alta potencia y su conversión para la electrólisis.
- *Responsabilidades Clave:* Diseño detallado de la subestación de interconexión y transformadores principales; especificación y diseño de la integración de grandes sistemas

rectificadores AC/DC; diseño de la distribución de potencia DC a los stacks/módulos de electrólisis (busbars, cableado especial); estudios de armónicos y calidad de energía; diseño de sistemas de puesta a tierra para equipos de potencia y DC; especificación de CCMs y tableros para BoP.

- *Capacidades/Formación:* Ingeniería Eléctrica con especialización en Sistemas de Potencia y/o Electrónica de Potencia. Experiencia en diseño de sistemas eléctricos industriales de alta corriente/voltaje. Conocimiento de rectificadores de alta potencia y sistemas DC. Manejo de software de simulación eléctrica (ETAP, DigSilent).

- **Ingeniero/a de Instrumentación y Control (I&C - H2/ATEX):**

- *Rol:* Diseña el sistema de control, protección y detección para la planta de H2.
- *Responsabilidades Clave:* Desarrollo de la arquitectura de control (DCS/PLC); diseño detallado de lazos de control y Sistemas Instrumentados de Seguridad (SIS) para paradas seguras según análisis LOPA/SIL; especificación de instrumentación para medir H2 (flujo másico, pureza, humedad) y parámetros de proceso (P, T, Nivel) en áreas clasificadas; diseño e ingeniería de sistemas de detección de fugas de H2 y de fuego (F&G); programación de la lógica de control y secuencias operativas/parada; diseño de la interfaz HMI para operadores.
- *Capacidades/Formación:* Ingeniería Electrónica, Automatización o Eléctrica con especialización en I&C. Experiencia (>5 años) en diseño I&C para plantas de proceso/gas. Conocimiento experto de normas de seguridad funcional (IEC 61511), áreas clasificadas (IEC 60079 / ATEX) y sistemas de detección F&G. Experiencia en programación DCS/PLC.

- **Gestor/a de Compras / Cadena de Suministro (Equipos H2):**

- *Rol:* Adquisición de equipos críticos como electrolizadores, compresores H2, sistemas PSA, etc.
- *Responsabilidades Clave:* Gestión de licitaciones y negociación con proveedores internacionales de tecnología de electrólisis y equipos mayores de BoP; aseguramiento de cumplimiento de especificaciones técnicas; gestión de contratos de suministro complejos; seguimiento de fabricación e inspecciones en origen (FAT).
- *Capacidades/Formación:* Ingeniería o Administración con experiencia en compras técnicas internacionales para proyectos de proceso/energía. Habilidades de negociación y gestión contractual. Inglés avanzado/bilingüe.

A.3. Construcción y Montaje en Sitio

Fase de ejecución física, donde la seguridad en el manejo de H2 es primordial.

- **Gestión y Supervisión (EPC/Owner):** (Ver perfiles en A.1, con énfasis en experiencia H2/proceso y liderazgo en seguridad).
- **HSE y QA/QC (con Foco H2):**
 - **HSE:** Ver descripción anterior, reforzar: **implementación de permisos de trabajo específicos para H2**, control estricto de fuentes de ignición, monitorización continua de atmósferas con equipos fijos y portátiles calibrados, planes de evacuación y respuesta a

emergencias detallados y ensayados para escenarios H2. Formación certificada en seguridad H2 es un requerimiento transversal (*GIZ/DP, Queensland*).

- **QA/QC:** Ver descripción anterior, reforzar: **inspección NDT 100% en soldaduras críticas de H2**, pruebas de fugas con Helio mandatorias para sistemas de H2, verificación de certificados de materiales específicos para H2, control dimensional y de limpieza interna de tuberías/equipos H2/O2/Agua Ultrapura.
- **Logística de Sitio:** Ver descripción anterior.
- **Obra Civil:** Ver descripción anterior, fundaciones para compresores H2 requieren diseño anti-vibratorio específico.
- **Montaje de Sistemas de Agua:**
 - **Técnicos/Oficiales:** Montaje de equipos (membranas RO, módulos EDI, filtros, bombas), instalación de tuberías (a menudo plásticas especiales como PVDF, PP), conexión. Requiere limpieza extrema y cuidado para no contaminar el sistema.
 - **Capacidades:** Formación técnica (Sanitaria, Mecánica) con experiencia en sistemas de tratamiento de agua industrial o de alta pureza. Habilidad en montaje de tuberías plásticas.
- **Montaje Mecánico y Piping (Proceso H2):**
 - **Montadores Mecánicos / Millwrights:** Ver descripción anterior, se suma montaje de stacks/módulos de electrolizadores según especificaciones OEM, montaje de compresores de H2 (reciprocantes/diafragma/centrífugos) con tolerancias precisas].
 - **Cañistas / Tuberías (Piping - Especializados H2):** Ver descripción anterior. Trabajo con acero inoxidable es común. Habilidad para realizar uniones bridadas con empaquetaduras adecuadas para H2 y torque controlado.
 - **Soldadores/as Calificados (Proceso/H2):** Ver descripción anterior. Calificación vigente en materiales y procedimientos específicos (WPS/PQR) para H2/inoxidable es crítica.
- **Montaje Eléctrico e I&C (Proceso H2):**
 - **Electricistas Industriales (ATEX):** Ver descripción anterior. Montaje de grandes rectificadores y cableado DC de alta potencia es una tarea especializada y crítica.
 - **Instrumentistas / Técnicos/as de Control (ATEX):** Ver Montaje de detectores de H2/llama (ubicación, calibración inicial), conexión de señales de seguridad (a SIS/ESD).
- **Montaje de Sistemas de Almacenamiento y Despacho/Dispensado de H2:**
 - **Montadores Mecánicos/Cañistas:** Instalación de tanques de almacenamiento de alta presión (cumpliendo normativa ASME Recipientes a Presión), montaje de skids de compresión final/dispensado, instalación de tuberías de alta presión y venteos asociados.
 - **Técnicos (E&I):** Instalación eléctrica y de control para los sistemas de dispensado y monitoreo de almacenamiento.
- **Oficios Auxiliares:** Ídem EERR.

A.4. Comisionado y Puesta en Marcha (H2 Específico)

Fase de altísimo riesgo que requiere personal experto y procedimientos exhaustivos.

- **Equipo Multidisciplinar (Ingenieros y Técnicos Especializados H2):**
 - *Rol:* Verificar la integridad y funcionalidad de todos los sistemas y realizar el arranque seguro de la producción de H2.
 - *Responsabilidades Clave:* Ver descripción detallada anterior. Enfatizar: **Secuencias de purgado con N2** para eliminar aire, **pruebas de estanqueidad con Helio** (más sensible que N2 para H2), introducción **extremadamente controlada** de H2, verificación de **todos los sistemas de detección y parada de emergencia (ESD/SIS)** antes de introducir H2, arranque secuencial (Agua->Electrólisis->Purificación->Compresión->Almac.), pruebas de rendimiento detalladas (eficiencia kWh/kg H2, pureza H2 según ISO 14687, capacidad)].
 - *Capacidades:* Experiencia demostrable en comisionado de plantas de H2 o gases peligrosos. Conocimiento profundo de las propiedades del H2 y los riesgos asociados. Disciplina extrema en el seguimiento de procedimientos. Capacidad de trabajo en equipo bajo presión.

Reflexión sobre Potencial Local (Construcción Electrólisis):

Similar a EERR, los oficios calificados (civil, montadores mecánicos/eléctricos/instrumentistas) y obreros tienen alto potencial local, **siempre y cuando reciban formación específica y rigurosa en seguridad H2 y particularidades del montaje (ej. áreas ATEX, tuberías especiales)**. El informe *GIZ/DP* y *MTSS* deberían guiar qué instituciones (UTU, INEFOP, UDELAR, UTEC) pueden ofrecer o adaptar esta formación crucial. Roles de supervisión y comisionado probablemente requerirán inicialmente experiencia internacional o de sectores afines con fuerte cultura de seguridad de procesos

Perfiles para Operación y Mantenimiento (O&M) de Plantas de Electrólisis

La operación segura, fiable y eficiente de los 9 GW de electrólisis y sus sistemas auxiliares durante décadas es fundamental para el éxito de este escenario. Esta fase requiere personal con formación técnica sólida, competencias específicas en manejo de hidrógeno y sistemas de proceso, y una cultura de seguridad muy arraigada. La digitalización (monitoreo remoto, análisis de datos, CMMS) y las estrategias de mantenimiento predictivo serán clave para optimizar costos y disponibilidad (*ETIPs Report, 2024*). Los perfiles identificados, muchos con necesidad de formación específica en Uruguay (*GIZ/DP Uruguay Report, 2024; MTSS Uruguay, 2024*), incluyen:

- **B.1. Gestión de Planta y Supervisión:**
 - **Jefe/a de Planta de Electrólisis/H2:**
 - *Rol:* Máximo responsable de la operación integral, segura y eficiente de la planta de producción de H2V y todos sus sistemas auxiliares.
 - *Responsabilidades Clave:* Asegurar el cumplimiento de los objetivos de producción (ktpa H2), eficiencia energética (kWh/kg H2), pureza del H2 (según especificación, ej. ISO 14687) y disponibilidad de la planta; liderar la implementación y el cumplimiento

riguroso de todas las políticas y procedimientos de Seguridad de Procesos (PSM) y HSE específicos para hidrógeno; gestionar el equipo de O&M (operadores, técnicos, soporte); elaborar y controlar el presupuesto operativo (OPEX); optimizar el rendimiento global de la planta; gestionar la interfaz con el proveedor de EERR y el sistema de transporte/cliente de H₂; asegurar el cumplimiento de normativas ambientales y permisos operativos.

- **Capacidades/Formación:** Titulación en Ingeniería (Química, Industrial, Mecánica, Eléctrica) con sólida experiencia (>7-10 años) en operación y/o mantenimiento de plantas de proceso químico, gases industriales o refinería, idealmente con experiencia directa en H₂ o gases inflamables/tóxicos. Fuerte liderazgo en seguridad, gestión de personal, conocimientos de gestión financiera y optimización de procesos. Inglés fluido. Formación específica certificada en gestión de seguridad de procesos y manejo de H₂.

○ **Supervisor/a de Turno (Producción H₂):**

- **Rol:** Lidera el equipo operativo durante su turno (24/7), asegurando la continuidad y seguridad de la producción.
- **Responsabilidades Clave:** Supervisión directa de operadores de CCR y campo; coordinación de actividades operativas según plan de producción; monitorización de parámetros clave y respuesta inicial a desviaciones/alarmas; gestión de permisos de trabajo en su turno; liderazgo en la respuesta inicial a emergencias según plan establecido; coordinación con mantenimiento para trabajos correctivos urgentes; reporte de novedades y estado de planta al jefe de planta.
- **Capacidades/Formación:** Formación técnica superior (Tecnólogo Químico, Procesos, Instrumentación) o Ingeniería, con amplia experiencia (>5 años) como operador senior en plantas de proceso. Profundo conocimiento técnico del proceso de electrólisis y BoP. Liderazgo operativo, toma de decisiones bajo presión, excelente comunicación. Formación específica en operación de la tecnología de electrólisis instalada y seguridad H₂.

○ **Supervisor/a de Mantenimiento (Electrólisis/BoP):**

- **Rol:** Lidera y coordina la ejecución de todas las actividades de mantenimiento de la planta.
- **Responsabilidades Clave:** Planificación y supervisión del mantenimiento preventivo, predictivo (vibraciones, termografía, análisis aceite) y correctivo de electrolizadores, sistemas de purificación de agua/H₂, compresores H₂, sistemas de almacenamiento, tuberías y válvulas, sistemas eléctricos y de control; gestión de órdenes de trabajo en CMMS (ej. SAP PM, Maximo); gestión del almacén de repuestos críticos; supervisión de la seguridad durante las tareas de mantenimiento (LOTO, permisos especiales); gestión de contratistas de mantenimiento especializados; análisis de fallos y propuesta de mejoras de fiabilidad.
- **Capacidades/Formación:** Formación técnica superior o Ingeniería (Mecánica, Eléctrica, Electromecánica). Experiencia (>5-7 años) en supervisión de mantenimiento en plantas industriales de proceso/gas. Conocimiento técnico de equipos (compresores alternativos/centrífugos, PSA, bombas, instrumentación). Dominio de herramientas

CMMS y estrategias de mantenimiento (preventivo, predictivo, RCM). Liderazgo de equipos técnicos. Fuerte enfoque en seguridad.

- **B.2. Operaciones:**

- **Operador/a de Sala de Control (CCR H2):**

- **Rol:** Monitorea y controla el proceso integrado desde la sala de control.
- **Responsabilidades Clave:** Operación del DCS/SCADA: vigilancia continua de parámetros de stacks (voltaje, corriente, T°, ΔP), eficiencia instantánea, pureza H2/O2 (analizadores en línea), calidad de agua, estado de sistemas de purificación (ciclos PSA), operación de compresores (etapas, T°, vibraciones), niveles y presiones en almacenamiento; ajuste de setpoints según plan de producción y eficiencia; gestión de alarmas (diagnóstico inicial, registro, escalamiento); coordinación con operadores de campo y UTE (si aplica para respuesta a demanda); ejecución de secuencias de arranque/parada seguras.
- **Capacidades/Formación:** Formación técnica (UTU Química, Procesos, Instrumentación, Automatización). Experiencia (>2-3 años) en operación de CCR en plantas de proceso continuo. Manejo experto de sistemas DCS/SCADA. Capacidad de interpretar tendencias, P&IDs, y responder a alarmas siguiendo procedimientos. Trabajo en turnos. Formación específica en el proceso de electrólisis y BoP.

- **Operador/a de Campo (H2):**

- **Rol:** Realiza la vigilancia y operaciones manuales en la planta física.
- **Responsabilidades Clave:** Rondas de inspección periódicas de todos los equipos (buscando fugas visuales/audibles/con detector portátil de H2, vibraciones anormales, niveles, presiones, temperaturas locales); toma de muestras de agua y H2 para análisis de laboratorio; operación local de válvulas, bombas, purgas según procedimiento; preparación segura de equipos para mantenimiento (aislamiento, bloqueo LOTO, purgado, inertización); supervisión local durante arranques/paradas; respuesta inicial a emergencias menores (ej. activación de sistemas contra incendios básicos). Mantenimiento del orden y limpieza.
- **Capacidades/Formación:** Formación técnica (UTU Química, Mecánica, Mantenimiento). Experiencia operativa en plantas industriales. Conocimiento práctico de equipos de proceso. **Formación obligatoria y rigurosa en riesgos y manejo seguro de H2**, uso de detectores de gas portátiles y equipos de protección personal (EPP). Capacidad de seguir procedimientos estrictos.

- **B.3. Mantenimiento:**

- **Técnico/a de Mantenimiento (Multi-skilled E&I / Mecánico - H2):**

- **Rol:** Ejecutor polivalente del mantenimiento preventivo y correctivo. La multi-habilidad es valorada (*Queensland Hydrogen Roadmap*).
- **Responsabilidades Clave (Ejemplos):**
 - **Eléctricas/Instrumentación (E&I):** Mantenimiento preventivo/correctivo de rectificadores (limpieza, conexiones, diagnóstico básico), apartamento MT/BT, motores eléctricos (pruebas, rodamientos), variadores de frecuencia; calibración periódica y troubleshooting de instrumentación crítica (analizadores H2/O2/H2O, detectores de fugas H2/llama, transmisores P/T/F en servicio H2, válvulas de control); mantenimiento

de sistemas de control PLC/DCS (reemplazo tarjetas, diagnóstico básico). Imprescindible experiencia y certificación para trabajar en áreas clasificadas (ATEX/IECEX).

- **Mecánicas:** Mantenimiento preventivo/correctivo de bombas (sellos, rodamientos), **compresores H2** (válvulas, sellos, enfriadores, sistemas de lubricación - requiere alta especialización según tipo), intercambiadores de calor (limpieza, pruebas de fugas), válvulas manuales y automáticas (reparación, cambio de internos/actuadores), inspección y mantenimiento básico de stacks/módulos según OEM (limpieza externa, conexiones), mantenimiento de sistemas PSA/secadores (válvulas, instrumentación).
- **Capacidades/Formación:** Formación técnica calificada (UTU o similar en Electricidad, Electrónica, Mecánica, Electromecánica, Instrumentación). Experiencia sólida (>3-5 años) en mantenimiento industrial multi-disciplina, idealmente en sector químico/gas/proceso. **Formación específica y certificada en seguridad H2 y trabajo en áreas clasificadas OBLIGATORIA.** Habilidades avanzadas de diagnóstico. Competencias digitales (CMMS, herramientas de diagnóstico portátiles). Posible estructura de niveles (I, II, III) según experiencia y certificaciones (*GIZ/DP* podría explorar esto para Uruguay).

○ **Técnico/a Especialista en Electrolizadores (Potencial):**

- **Rol:** Experto/a en el mantenimiento avanzado y diagnóstico de los stacks/módulos de electrólisis.
- **Responsabilidades Clave:** Inspecciones internas (si diseño lo permite), diagnóstico avanzado de rendimiento/degradación a nivel de celda/stack, reemplazo de componentes internos críticos (membranas, electrodos, sellos), coordinación directa con soporte técnico del OEM, implementación de mejoras/actualizaciones en los stacks.
- **Capacidades/Formación:** Formación técnica superior con especialización muy profunda en la tecnología de electrólisis específica (PEM, Alcalina, SOEC, AEM) a través de formación intensiva del OEM. Experiencia significativa (>5 años) en O&M de electrolizadores.

○ **Técnico/a Tratamiento de Agua:**

- **Rol:** Mantiene la producción continua de agua ultrapura.
- **Responsabilidades Clave:** Operación y mantenimiento preventivo/correctivo de sistemas RO/EDI (limpieza/reemplazo membranas, regeneración/cambio resinas EDI, mantenimiento bombas alta presión, filtros); monitoreo y ajuste de dosificación química (anti-incrustante, etc.); control riguroso de parámetros de calidad del agua en todas las etapas; gestión de consumibles.
- **Capacidades/Formación:** Formación técnica (Química, Tratamiento de Aguas) o experiencia relevante. Conocimiento práctico de química del agua, procesos de membrana y deionización.

○ **Técnico/a Manejo de H2 (Compresión/Almacenamiento):**

- **Rol:** Especialista en O&M de sistemas de H2 a alta presión post-electrólisis.

- **Responsabilidades Clave:** Mantenimiento preventivo/predictivo/correctivo de compresores de H₂ (reciprocantes/diafragma/iónicos – según tecnología); mantenimiento de sistemas de almacenamiento de alta presión (inspección de tanques, válvulas de seguridad, venteos); operación y mantenimiento de sistemas de carga/dispensado si aplica; gestión de la pureza del H₂ en almacenamiento; inspección y mantenimiento de sistemas de detección de fugas fijos.
- **Capacidades/Formación:** Formación técnica (Mecánica, Mantenimiento Industrial). Experiencia (>3-5 años) en O&M de compresores de alta presión y manejo de gases industriales, idealmente H₂. Conocimiento profundo de normas de seguridad para H₂ a alta presión (ej. ISO 19880 para estaciones de servicio si aplica).
- **B.4. Soporte Técnico, Calidad y HSE:**
 - **Ingeniero/a de Procesos (Electrólisis):**
 - **Rol:** Optimiza el rendimiento y la fiabilidad de la planta de H₂V.
 - **Responsabilidades Clave:** Monitorización continua de KPIs clave (eficiencia específica kWh/kg H₂, tasa de degradación, pureza H₂/O₂, disponibilidad); análisis de tendencias y diagnóstico de desviaciones; optimización de parámetros operativos (T°, P, flujos, ciclos PSA) para maximizar eficiencia y vida útil; liderazgo técnico en análisis RCA de fallos mayores; evaluación e implementación de mejoras (MOC - Management of Change); soporte técnico avanzado a Operaciones y Mantenimiento; seguimiento de la gestión de catalizadores/membranas/electrodos; revisiones periódicas de seguridad de proceso (PHA, HAZOP review). Aplicación de principios de *Energy Management Systems (JSQI Skills, 2023)*.
 - **Capacidades/Formación:** Ingeniería Química/Procesos, idealmente con conocimientos de electroquímica. Experiencia en operación/ingeniería de plantas de proceso/gas. Capacidad analítica avanzada (manejo de datos, simulación). Conocimiento de PSM.
 - **Técnico/a de Laboratorio (H₂/Agua):**
 - **Rol:** Asegura la calidad de insumos y productos mediante análisis.
 - **Responsabilidades Clave:** Realización de análisis de pureza de H₂ según estándar requerido (ISO 14687 para movilidad, o especificación de cliente industrial) usando Cromatografía de Gases (GC) u otros analizadores específicos (detección de H₂O, O₂, N₂, CO, S, etc.); análisis completos de calidad de agua de alimentación y proceso (pH, conductividad, TOC, sílice, cloruros, etc.); calibración y mantenimiento básico de equipos de laboratorio; gestión de muestras y reactivos; registro de resultados en LIMS (Laboratory Information Management System).
 - **Capacidades/Formación:** Formación técnica (UTU Química, Laboratorio Químico). Experiencia en laboratorio industrial, preferentemente con manejo de GC y análisis de agua. Buenas Prácticas de Laboratorio (BPL). Atención al detalle.
 - **Coordinador/a HSE (O&M H₂):**
 - **Rol:** Supervisa la gestión HSE específica para la operación con H₂.
 - **Responsabilidades Clave:** Adaptación e implementación continua del Sistema de Gestión HSE; auditorías HSE enfocadas en riesgos H₂ (fugas, ignición, manejo seguro); supervisión de permisos de trabajo especiales para H₂; investigación de incidentes H₂; capacitación periódica obligatoria en seguridad H₂ para todo el personal O&M y contratistas; gestión de planes de emergencia específicos; seguimiento de cumplimiento ambiental operativo

(vinteos, efluentes tratamiento agua). Fuerte énfasis en cultura de seguridad proactiva (ILO, GIZ/DP).

- **Capacidades/Formación:** Titulación habilitante (Téc. Prevencionista, etc.) con **formación y experiencia demostrable en Seguridad de Procesos (PSM) y/o Seguridad específica de Hidrógeno.**

C. Perfiles Potenciales de I+D+i en H2V (Ecosistema Local)

Apalancando las capacidades existentes y la escala del despliegue, podrían fortalecerse o surgir roles en I+D+i aplicada.

- **Investigador/a / Científico/a (Electroquímica, Materiales, Procesos H2):**
 - *Rol:* Genera conocimiento para optimizar la cadena H2V en el contexto uruguayo.
 - *Responsabilidades Clave:* Investigación sobre adaptación/durabilidad de electrolizadores (PEM, Alcalina, AEM, SOEC) a condiciones locales (agua, operación intermitente con EERR); desarrollo/evaluación de materiales (catalizadores no-PGM, membranas más robustas); modelado avanzado de integración EERR-Electrólisis-Red; optimización de procesos BoP (purificación, compresión eficiente); estudios de seguridad aplicada H2; análisis tecno-económicos y de ciclo de vida de rutas H2V locales; publicación y divulgación; captación de fondos (ANII, internacionales).
 - *Capacidades/Formación:* Doctorado (PhD) o Maestría (MSc) en Química, Física, Ing. Química/Materiales/Eléctrica con especialización relevante. Experiencia demostrada en investigación (publicaciones).
- **Ingeniero/a de I+D (H2V - Desarrollo/Integración):**
 - *Rol:* Transforma conocimiento en soluciones tecnológicas probadas a escala piloto/demostrativa.
 - *Responsabilidades Clave:* Diseño, construcción y operación de bancos de prueba y plantas piloto de electrólisis/derivados; integración y prueba de nuevos componentes o sistemas de control; validación experimental de modelos; adaptación de tecnologías importadas; desarrollo de soluciones de monitorización/diagnóstico avanzadas; colaboración con industria para pruebas de concepto; análisis técnico-económico de escalado.
 - *Capacidades/Formación:* Titulación en Ingeniería (Química, Eléctrica, Mecánica, Control) con experiencia práctica en desarrollo experimental, prototipado o ingeniería de detalle. Habilidades en diseño CAD, instrumentación, control, análisis de datos.
- **Técnico/a de Laboratorio / Soporte a I+D (H2):**
 - *Rol:* Apoyo esencial en la ejecución experimental.
 - *Responsabilidades Clave:* Montaje/desmontaje de setups; operación segura de equipos de prueba (incluyendo manejo de H2 en laboratorio); realización de mediciones y análisis (GC, electroquímicos, etc.); mantenimiento básico de equipos; gestión de insumos/gases; registro de datos.

- *Capacidades/Formación:* Formación técnica superior (UTU Química, Mecánica, Electrónica, Laboratorio). Experiencia en laboratorios. Habilidad instrumental y seguimiento de protocolos.
Formación específica en seguridad H2 para laboratorio.
- **Gestor/a de Proyectos de I+D+i / Vinculación Tecnológica (H2V):**
 - *Rol:* Puente entre la investigación, la financiación y la industria H2V.
 - *Responsabilidades Clave:* Identificación de oportunidades de I+D+i alineadas con estrategia H2V nacional; formulación y gestión de proyectos para ANII, fondos internacionales, etc.; facilitación de consorcios UDELAR/UTEC/LATU/Industria; scouting tecnológico; apoyo en transferencia de tecnología y propiedad intelectual; organización de workshops/seminarios.
 - *Capacidades/Formación:* Base técnica + experiencia en gestión de I+D+i, vinculación o desarrollo de negocios tecnológicos. Conocimiento del Sistema Nacional de Innovación y del sector H2V emergente. Habilidades de comunicación y gestión.

Plantas de e-Metanol

En la estructura de producción aquí definida, se establece la construcción de dos plantas principales de e-Metanol: una de **500 ktpa en Paysandú** (para exportación) y una de **3300 ktpa en Durazno** (que produce para mercado local, exportación y como feedstock para e-SAF). Ambas utilizan la ruta de **síntesis por hidrogenación de CO₂** ($\text{CO}_2 + 3\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_3\text{OH} + \text{H}_2\text{O}$) con H2V y CO₂ biogénico.

La construcción y operación de estas plantas químicas requiere perfiles similares a los de otras plantas de proceso, pero con especificidades relacionadas con la catálisis, la alta presión del loop de síntesis, la destilación para purificación, y el manejo seguro del metanol (tóxico e inflamable).

Perfiles Ocupacionales Para Construcción Y Operación De Plantas De E-Metanol (Síntesis / Hidrogenación De Co₂)

Las plantas de e-Metanol son instalaciones de proceso químico que convierten H2V y CO₂ capturado en metanol líquido de alta pureza (grado AA). Este escenario contempla una capacidad total significativa (3800 ktpa nominales entre Durazno y Paysandú). La ejecución y operación de estas plantas requiere personal con sólida formación técnica en procesos químicos, mecánica, electricidad e instrumentación, y un conocimiento profundo de las normas de seguridad para procesos químicos y manejo de sustancias peligrosas como el metanol.

A. Perfiles para Construcción, Montaje y Puesta en Marcha de Plantas de e-Metanol

Esta fase implica la construcción civil, el montaje de equipos de proceso específicos (reactores, columnas de destilación, compresores, intercambiadores) y tuberías, la instalación eléctrica y de control, y un comisionado cuidadoso del proceso catalítico.

- **A.1. Ingeniería de Diseño y Detalle (EPC - Off-Site/Indirecto):**
 - **Equipo de Ingeniería Multidisciplinar:**
 - **Ingenieros/as de Procesos (Síntesis MeOH):**

- **Rol:** Diseña el corazón del proceso: el loop de síntesis y la purificación.
- **Responsabilidades Clave:** Diseño detallado de P&IDs; balances de masa y energía; **dimensionamiento y especificación de reactores de síntesis** (tipo, catalizador, sistema de refrigeración); **diseño y simulación de columnas de destilación** para purificación de metanol (separación de agua y subproductos); diseño de sistemas de compresión para gas de síntesis (H_2+CO_2) y gas de reciclo; diseño de sistemas de recuperación de calor; análisis HAZOP/LOPA específico para el proceso de metanol; definición de filosofía de control del reactor y columnas. **Modelado y simulación (Aspen HYSYS/Plus) del loop de síntesis completo**, incluyendo reactor(es) catalíticos, intercambiadores, separadores y sistema de reciclo de gases no convertidos; **diseño detallado de las columnas de destilación** para alcanzar alta pureza (Grado AA); diseño de sistemas de recuperación de calor para optimizar eficiencia energética; **análisis HAZOP/LOPA específico para metanol** (inflamabilidad, toxicidad, alta presión)
- **Capacidades/Formación:** Ing. Química. Experiencia (>5 años) en diseño de plantas de síntesis química, idealmente metanol, amoníaco o procesos catalíticos a alta presión. Dominio de simulación (Aspen HYSYS/Plus). Conocimiento de catálisis heterogénea, termodinámica y destilación. Normas de seguridad de procesos.
- **Ingenieros/as Mecánicos (Equipos de Proceso):**
- **Rol:** Especifica y diseña los equipos mecánicos clave.
- **Responsabilidades Clave:** Diseño/especificación técnica detallada de **reactores de alta presión, columnas de destilación altas, compresores centrífugos o reciprocantes** para gas de síntesis/reciclo, intercambiadores de calor (incluyendo rehervidores/condensadores de columnas), bombas para metanol/agua, recipientes a presión. Aseguramiento de cumplimiento de códigos (ASME VIII, API). Análisis de elementos finitos (FEA) para equipos críticos si es necesario. Especificación de **reactores catalíticos de alta presión** (diseño, materiales, internos); diseño de **grandes columnas de destilación** (altura, platos/rellenos, materiales); especificación de **compresores centrífugos o reciprocantes** para gas de síntesis (H_2+CO_2) y reciclo; diseño de **sistemas de almacenamiento de metanol** (tanques API 650/620, sistemas de venteo/blanketing)
- **Capacidades/Formación:** Ing. Mecánica. Experiencia (>5 años) en diseño/especificación de equipos estáticos y rotativos para industria química/petroquímica/gas. Conocimiento de códigos ASME/API. Software de diseño mecánico y FEA.
- **Ingenieros/as de Tuberías (Piping - Proceso Químico):**
- **Rol:** Diseña la red de tuberías para H_2 , CO_2 , metanol (líquido/vapor), agua y servicios auxiliares.
- **Responsabilidades Clave:** Diseño 3D; selección de materiales (aceros al carbono, inoxidable) adecuados para cada fluido y condición (P, T); cálculo de espesores; análisis de estrés para líneas de alta presión/temperatura o sujetas a vibración; diseño de soportes; generación de isométricos. Selección de materiales y empaquetaduras compatibles con H_2 , CO_2 , metanol y subproductos en diferentes condiciones P/T]
- **Capacidades/Formación:** Ing. Mecánica/Industrial. Experiencia (>5 años) en diseño piping para plantas de proceso. Conocimiento códigos ASME B31.3. Dominio software 3D y análisis de estrés (CAESAR II).
- **Ingenieros/as Eléctricos / I&C:** (Similares a Electrólisis, pero adaptados a los equipos específicos de la planta de metanol - compresores grandes, bombas, sistemas de control de

destilación, instrumentación analítica para metanol). Diseño de áreas clasificadas (metanol es inflamable). Diseño de SIS para proteger reactores/columnas. Electrólisis, adaptado a cargas de grandes compresores, bombas y sistemas de control de destilación. **Diseño ATEX** para áreas con riesgo de vapores de metanol. Diseño de **SIS** para proteger reactor/columnas.

- **A.2. Construcción y Montaje en Sitio:**

- **Gestión y Supervisión:** (Similares a Electrólisis, se valora experiencia en **plantas químicas y manejo de líquidos/gases inflamables y tóxicos**).

- **HSE y QA/QC:**

- **HSE:** Foco en riesgos de **metanol (toxicidad por inhalación/contacto, inflamabilidad)**, alta presión (loop de síntesis), altas temperaturas, manejo de catalizadores (pueden ser pirofóricos o requerir manejo especial), espacios confinados (reactores, columnas). Implementación rigurosa de PTW. Planes de emergencia específicos para fugas/derrames/incendios de metanol. Formación específica para todo el personal. Foco extremo en riesgos de **metanol (toxicidad aguda/crónica por inhalación/contacto dérmico, alta inflamabilidad LII/LSI 1.4-36% vol)**. Procedimientos específicos para manejo seguro de metanol durante construcción/pruebas, espacios confinados (reactores, columnas), trabajos en caliente. Planes de emergencia para derrames/incendios de metanol. Formación específica para todo el personal

- **QA/QC:** Inspección de soldaduras en equipos a presión/tuberías; control de montaje de internos de reactores/columnas; verificación de alineación de grandes compresores/bombas; pruebas de presión/fugas de sistemas; control de limpieza; verificación de instalación ATEX. Inspectores certificados (CWI, NDT, API si aplica a equipos). Inspección de soldaduras y materiales para equipos/tuberías a presión según códigos (ASME VIII, B31.3); control riguroso del montaje de internos de reactores/columnas; pruebas de presión/fugas; verificación de instalación ATEX.

- **Montaje Mecánico y Piping:**

- **Montadores Mecánicos / Millwrights:** Montaje de reactores, columnas de destilación (secciones, internos - platos/rellenos), compresores de proceso, bombas, intercambiadores. Requiere experiencia en montaje de equipos grandes y pesados de proceso químico. montaje de **internos de columnas** (platos, rellenos), instalación y alineación de **grandes compresores de proceso**

- **Cañistas / Tuberías (Piping Proceso):** Montaje de tuberías de proceso (acero al carbono/inoxidable) según isométricos. Habilidad en uniones bridadas y soporte a soldadores.

- **Soldadores/as Calificados:** Calificación vigente según WPS/ASME IX para los materiales y espesores de las tuberías/equipos de proceso.

- **Equipo de Montaje de Internos / Manejo de Catalizador (Potencialmente Subcontratista Especializado):** Instalación cuidadosa de internos de columnas (platos, rellenos estructurados/aleatorios) y, críticamente, **carga del catalizador de síntesis** en el reactor bajo condiciones controladas (puede requerir atmósfera inerte, procedimientos específicos del licenciante/fabricante del catalizador).

- **Equipo de Manejo de Catalizador (Subcontratista Especializado):**

- **Rol:** Realiza la carga del catalizador de síntesis en el reactor.

- **Responsabilidades:** Carga del catalizador bajo condiciones controladas (posiblemente atmósfera inerte de N₂) utilizando equipos y procedimientos específicos para evitar daños al

catalizador, contaminación o riesgos de seguridad (algunos catalizadores pueden ser pirofóricos). Sigue estrictamente las indicaciones del licenciante/fabricante del catalizador.

- **Capacidades:** Experiencia específica en manejo de catalizadores industriales. Formación en seguridad para espacios confinados y atmósferas inertes. Rigor procedimental.
- **Montaje Eléctrico e I&C:** (Similar a Electrólisis, adaptado a equipos de planta de metanol. Instrumentación incluye analizadores en línea - GC para metanol, transmisores P, T, F, L para control de reactores y columnas). Instalación en áreas clasificadas (ATEX Zona 1 o 2).
- **Montaje de Almacenamiento y Despacho de Metanol:**
 - **Rol:** Construye la infraestructura para almacenar el producto final y cargarlo para transporte.
 - **Responsabilidades:** Montaje de grandes tanques de techo fijo o flotante interno para metanol (según API 650); instalación de sistemas de bombeo de metanol; montaje de líneas de carga/descarga para ferrocarril (principalmente) y potencialmente camiones; instalación de sistemas de medición de nivel/flujo y seguridad (ej. prevención sobrellenado, sistemas de venteo/recuperación de vapores - VRU).
 - **Capacidades:** Montadores/Cañistas con experiencia en tanques de almacenamiento de líquidos y tuberías asociadas. Técnicos E&I con experiencia en instrumentación de tanques y sistemas de carga/descarga, preferentemente ATEX.
 - **Montadores/Cañistas:** Instalación de grandes tanques de almacenamiento de metanol (atmosféricos o baja presión, cumpliendo normas API 650/620), sistemas de bombeo de producto, líneas de carga a camiones/tren/barco, sistemas de recuperación de vapores (VRU) si aplica.
 - **Técnicos E&I:** Instrumentación de tanques (nivel, T°), sistemas de control de bombeo, sistemas de seguridad para carga/descarga (puesta a tierra, detección de sobrellenado).
- **A.3. Comisionado y Puesta en Marcha (Planta Química):**
 - **Equipo Multidisciplinar de Comisionado (Ingenieros y Técnicos Especializados en Procesos Químicos/Catálisis):**
 - **Rol:** Puesta en marcha segura y eficiente del proceso de síntesis y purificación.
 - **Responsabilidades Clave:** Desarrollo/ejecución de procedimientos detallados para: Limpieza/soplado/secado de sistemas; pruebas de presión/fugas; inertización; **reducción/activación del catalizador de síntesis** (etapa crítica y delicada); introducción controlada de H₂ y CO₂; estabilización del loop de reacción (control T°/P, análisis de composición de reciclo); arranque y **optimización del tren de destilación** (control de reflujo, T°, niveles) para alcanzar pureza de metanol Grado AA (según especificación IMPCA); pruebas de rendimiento garantizado (PTR); operación asistida y transferencia a O&M.
 - **Capacidades:** Experiencia indispensable (>5-7 años) en comisionado/arranque de **plantas de síntesis catalítica** (metanol, amoníaco, GTL) y **destilación**. Conocimiento profundo de catálisis, reactores, columnas, compresores y seguridad de procesos químicos. Metodología rigurosa y capacidad de diagnóstico.

B. Perfiles para Operación y Mantenimiento (O&M) de Plantas de e-Metanol

Operación continua de un proceso químico que involucra gases a presión, catálisis y destilación, con manejo de metanol.

- **B.1. Gestión de Planta y Supervisión:**

- **Jefe/a de Planta (e-MeOH):** Ingeniería Química preferentemente, con experiencia (>7-10 años) en gestión de plantas de síntesis química. Responsable de seguridad, producción, eficiencia (conversión H₂/CO₂, consumo energético), calidad del producto, costos OPEX, gestión del catalizador (vida útil, reemplazo), cumplimiento ambiental y de seguridad, gestión del catalizador (vida útil, envenenamiento), optimización energética global de la planta.
- **Supervisor/a de Turno (Producción MeOH):** Formación técnica superior/Ingeniería Química. Experiencia operativa (>5 años). Lidera equipo de operadores 24/7, supervisa loop de síntesis y destilación, coordina con mantenimiento/laboratorio, gestiona permisos de trabajo, primera respuesta a emergencias (fugas, incendios).
- **Supervisor/a de Mantenimiento (Planta Química):** Formación técnica superior/Ingeniería (Mecánica/Eléctrica). Experiencia (>5-7 años) en supervisión de mantenimiento en sector químico/petroquímico/gas. Gestiona mantenimiento preventivo/predictivo/correctivo de reactores, columnas, compresores, bombas, intercambiadores, válvulas, E&I. Dominio CMMS. Foco en seguridad de mantenimiento (LOTO, espacios confinados, trabajos en caliente).

- **B.2. Operaciones:**

- **Operador/a de Sala de Control (CCR MeOH):** Formación técnica (UTU Química/Procesos). Experiencia (>3 años) en CCR de plantas de proceso continuo. Manejo experto DCS. Controla parámetros críticos del reactor (T°, P, flujo), loop de reciclaje, columnas de destilación (T°, P, niveles, reflujo), pureza del producto. Gestiona alarmas y secuencias operativas. Monitorización detallada del **perfil de temperatura del reactor catalítico**, control de la **composición del gas de síntesis/reciclo**, operación del **sistema de destilación** para cumplir especificación de pureza Grado AA, gestión de venteos/purgas
- **Operador/a de Campo (MeOH):** Formación técnica (UTU Química/Mecánica). Experiencia operativa en campo. Rondas de inspección (fugas, vibraciones, niveles), toma de muestras, operación local de válvulas/bombas, preparación de equipos para mantenimiento (LOTO, purgado, limpieza), manejo seguro de metanol (carga/descarga, respuesta a derrames). **Muestreo seguro de metanol** y otros fluidos de proceso, operación local de sistemas de carga/descarga de metanol, vigilancia específica de compresores y bombas de alta presión, respuesta a fugas/derrames de metanol **Formación específica en riesgos y manejo seguro de metanol obligatoria.**

- **B.3. Mantenimiento:**

- **Técnico/a de Mantenimiento (Multi-skilled E&I / Mecánico - Planta Química):** Formación técnica calificada (UTU Mecánica/Electricidad/Instrumentación). Experiencia (>3-5 años) en mantenimiento industrial químico/petroquímico.
- **Mecánico:** Mantenimiento de compresores de proceso (H₂/syngas), bombas (centrífugas, alternativas), intercambiadores, válvulas de control/seguridad, equipos rotativos. Conocimiento de sellos mecánicos, alineación láser. Mantenimiento básico de reactores/columnas en paradas.

- *E&I*: Mantenimiento de motores/variadores (compresores), instrumentación de proceso (P, T, F, L, analizadores - GC), válvulas de control, sistemas de control (PLC/DCS - diagnóstico básico), sistemas SIS, detectores F&G (metanol/fuego). Experiencia ATEX.
- Mantenimiento de **compresores de proceso** (H₂/CO₂/Reciclo), inspección/mantenimiento de **reactores y columnas** (en paradas), mantenimiento de **bombas para metanol, válvulas de control/seguridad** en servicio químico, **instrumentación analítica en línea (GC)**
- **Formación específica en seguridad química y procedimientos de trabajo seguro** (LOTO, espacios confinados, etc.) es crucial.

- **B.4. Soporte Técnico, Calidad y HSE:**

- **Ingeniero/a de Procesos (e-MeOH):** Ingeniería Química. Experiencia en optimización de plantas de síntesis. Monitoriza rendimiento del catalizador, eficiencia de conversión y destilación, consumo energético. Propone mejoras. Realiza troubleshooting avanzado. Lidera análisis de seguridad de proceso (PHA). **Seguimiento y optimización del rendimiento del catalizador**, modelado/simulación para optimizar operación de reactores y destilación, análisis de eficiencia energética, liderazgo en análisis de seguridad de proceso (PHA reviews, MOC). Ing. Química con experiencia en procesos catalíticos/destilación.
- **Técnico/a de Laboratorio:** Formación técnica (UTU Química). Experiencia en laboratorio químico industrial. Realiza análisis de pureza de H₂/CO₂/Metanol (GC es clave), análisis de agua de proceso, efluentes. Control de calidad según especificaciones (IMPCA para metanol). Manejo seguro de químicos de laboratorio. Análisis **GC para pureza de metanol según IMPCA Grado AA** (agua, etanol, acetona, acidez, etc.), análisis de gases de proceso, control calidad agua/vapor. Formación UTU Química/Laboratorio.
- **Coordinador/a HSE (O&M MeOH):** Técnico Prevencionista/Ingeniero con experiencia en industria química. Foco en riesgos específicos de metanol (toxicidad, inflamabilidad), alta presión, manejo seguro de catalizadores, planes de emergencia química, cumplimiento ambiental (emisiones, efluentes). Foco en gestión de riesgos de **toxicidad e inflamabilidad del metanol**, PSM, planes de emergencia química, cumplimiento ambiental (emisiones atmosféricas, efluentes líquidos).

- **B.5. Logística de Producto:**

- **Coordinador/a de Carga/Descarga y Almacenamiento:** Gestiona el almacenamiento seguro de metanol en tanques, coordina las operaciones de carga a trenes/camiones/barcos asegurando cumplimiento de normativas de transporte de mercancías peligrosas. Control de inventario de producto final.
- **Coordinador/a de Suministro de Materias Primas (H₂/CO₂):**
 - Rol: Asegura la recepción continua y en especificación de H₂ y CO₂ vía ductos.
 - Responsabilidades Clave: Interfaz operativa con los proveedores/transportistas de H₂ y CO₂; monitorización de caudal, presión y calidad de los gases recibidos; coordinación de nominaciones y balances diarios/semanales; gestión de contingencias ante interrupciones de suministro.

- Capacidades/Formación: Formación técnica o en logística. Experiencia en gestión de suministro de gases industriales o coordinación logística. Conocimiento básico de operación de ductos y sistemas de medición.
- **Especialista en Logística y Despacho (e-Metanol):**
 - Rol: Gestiona el almacenamiento, transporte y entrega del metanol producido.
 - Responsabilidades Clave: Supervisión de niveles y operaciones en parque de tanques de metanol; planificación y coordinación de operaciones de carga a ferrocarril (principal vía de evacuación); aseguramiento de cumplimiento de normativas de transporte de mercancías peligrosas (IMDG si aplica a exportación); gestión de documentación de despacho (certificados de calidad, manifiestos de carga); interfaz con operador ferroviario, terminal portuaria y/o clientes finales; control de inventario de producto terminado.
 - Capacidades/Formación: Formación en Logística, Comercio Exterior o similar. Experiencia (>3-5 años) en logística de productos químicos líquidos a granel, idealmente mercancías peligrosas. Conocimiento de operativa ferroviaria y portuaria en Uruguay. Manejo de sistemas de gestión de inventarios/despacho. Normativa de transporte (Terrestre/Marítimo).
- **Gestor/a Comercial / Ventas (e-Metanol Exportación/Local):**
 - Rol: Responsable de la comercialización del producto. (Puede ser un rol corporativo más que de planta).
 - Responsabilidades Clave: Gestión de contratos de venta a largo plazo y/o ventas spot; análisis de mercados internacionales/regionales de metanol (precios, demanda, competidores); desarrollo y mantenimiento de relaciones con clientes (industria química, sector marítimo para bunkering, etc.); coordinación con logística para asegurar entregas.
 - Capacidades/Formación: Titulación en Administración, Economía, Comercio Exterior, Ingeniería Química con perfil comercial. Experiencia en ventas B2B de productos químicos/commodities energéticos. Conocimiento de mercados internacionales. Habilidades de negociación. Inglés avanzado/bilingüe.

Reflexión sobre Potencial Local (e-Metanol):

- La operación de plantas de metanol requiere una base sólida en **Ingeniería Química y formación técnica en Procesos Químicos (UTU)**. Uruguay tiene estas bases, pero se necesitará **formación específica intensiva** en el proceso de síntesis de metanol y, sobre todo, en **seguridad química y manejo de metanol**.
- Los roles de mantenimiento requerirán adaptación de técnicos E&I y mecánicos industriales, con **capacitación ATEX y en seguridad química**.
- Las nuevas funciones de **logística de materias primas (H₂/CO₂ por ducto) y producto final (metanol por tren/barco)** crearán perfiles nuevos o demandarán adaptación de profesionales de logística existentes a las particularidades de estos productos y modos de transporte.

Perfiles Ocupacionales Para Construcción Y Operación De Planta MtJ (e-SAF)

La producción de Combustible Sostenible de Aviación (e-SAF) mediante la tecnología Methanol-to-Jet (MtJ) representa un eslabón de alto valor agregado en la cadena de valor del H₂V de este escenario. Esta planta, con una capacidad de **517 ktpa** y ubicada estratégicamente junto a la refinería de **ANCAP**

en **Montevideo**, convierte e-Metanol (producido en Durazno) en un combustible "drop-in" para la aviación. La posible integración con la refinería existente, incluyendo el potencial uso de hidrógeno de la misma (según sugiere el informe *Ausenco, 2024*), añade complejidad y oportunidades específicas. La construcción y operación requieren personal familiarizado con **procesos catalíticos, separación de hidrocarburos y operaciones tipo refinería**, además de la gestión de seguridad inherente.

La proximidad e integración potencial con la refinería de ANCAP es una ventaja significativa, abriendo oportunidades para sinergias operativas, como el suministro de H₂ (contemplado en el escenario), **posibles servicios auxiliares compartidos (vapor, agua tratada, sistemas de efluentes), soporte de mantenimiento especializado para equipos tipo refinería, o incluso la coordinación de equipos y planes de respuesta a emergencias.**

A. Perfiles para Construcción, Montaje y Puesta en Marcha de Planta MtJ

Esta fase implica construir una unidad de proceso químico compleja, similar en algunos aspectos a unidades de refinería o petroquímica, que maneja metanol, hidrocarburos intermedios y producto final tipo queroseno.

- **A.1. Ingeniería de Diseño y Detalle (EPC - Off-Site/Indirecto):**
 - **Equipo de Ingeniería Multidisciplinar:**
 - **Ingenieros/as de Procesos (MtJ/Refino):**
 - *Rol:* Diseña la unidad de conversión de Metanol a Jet Fuel.
 - *Responsabilidades Clave:* Selección/adaptación de la tecnología MtJ licenciada (este proceso típicamente incluye etapas secuenciales como la deshidratación catalítica del metanol a DME, la conversión del DME sobre catalizadores de zeolita a hidrocarburos, y un complejo sistema de fraccionamiento y potencialmente hidrotratamiento para obtener la fracción e-SAF cumpliendo estrictas especificaciones aeronáuticas - ej. ASTM D7566); P&IDs detallados; balances de masa/energía; **diseño de reactores catalíticos** (probablemente lecho fijo con múltiples etapas o reactores específicos según licenciante); **diseño del sistema de fraccionamiento/separación** para obtener la fracción Jet Fuel con especificaciones aeronáuticas (ASTM D7566 / D1655); diseño de sistemas de tratamiento de efluentes/gases; **integración con servicios auxiliares (vapor, H₂ si aplica) de la refinería ANCAP**; análisis HAZOP/LOPA específico para MtJ (manejo de metanol, hidrocarburos intermedios/finales).
 - *Capacidades/Formación:* Ing. Química. Experiencia (>5-7 años) en diseño de **unidades de proceso catalítico en refinerías o petroquímicas** (ej. FCC, hidrotratamiento, isomerización, GTL). Conocimiento de procesos MtJ es un plus muy valorado. Dominio de simulación (Aspen HYSYS/Plus). Normas de seguridad de procesos API/NFPA.
 - **Ingenieros/as Mecánicos (Equipos de Proceso/Refino):** Especificación técnica de reactores, **columnas de fraccionamiento**, hornos (si aplica), compresores (si aplica para H₂ de refinería), bombas (API 610), intercambiadores, aerorefrigeradores, tanques de almacenamiento de hidrocarburos (API 650). Conocimiento de materiales para servicio de refinería (temperaturas, corrosión). Códigos ASME VIII/B31.3.
 - **Ingenieros/as de Tuberías (Piping - Proceso Refino):** Diseño 3D piping; selecciones materiales de para metanol e hidrocarburos; cálculo espesores; **análisis de estrés para sistemas con alta**

temperatura/presión o vibración; diseño soportes; isométricos. Experiencia en diseño piping para refinerías/petroquímica.

- **Ingenieros/as Eléctricos / I&C (ATEX/SIS):** Diseño alimentación eléctrica; **diseño áreas clasificadas ATEX** (metanol, hidrocarburos); diseño **SIS (IEC 61511)** para proteger reactores/hornos/columnas; especificación instrumentación (analizadores calidad Jet Fuel en línea, P, T, F, L) y válvulas control/on-off para servicio refinería/ATEX. Programación DCS/PLC/SIS.

- **A.2. Construcción y Montaje en Sitio:**

- **Gestión y Supervisión:** Requiere **experiencia probada en construcción dentro de refinerías o complejos petroquímicos**, con conocimiento de sus estrictos estándares de seguridad y procedimientos de trabajo.
- **HSE y QA/QC:**
 - **HSE:** Foco en riesgos combinados: **metanol** (tóxico/inflamable), **hidrocarburos intermedios/finales** (inflamables), **hidrógeno** (si se usa de refinería), altas T/P, catalizadores, trabajo en altura/espacios confinados. Sistema PTW muy riguroso, adaptado a posible interfaz con refinería operativa. Planes de emergencia específicos. Formación continua. Rol del Técnico Prevencionista uruguayo.
 - **QA/QC:** Inspección rigurosa de soldaduras (NDT) equipos/tuberías (ASME); control montaje internos reactores/columnas; verificación materiales; pruebas presión/fugas; **inspección detallada instalación ATEX**. Inspectores certificados (CWI, NDT, API).
- **Montaje Mecánico y Piping:**
 - **Montadores Mecánicos / Millwrights:** Montaje de reactores, columnas, hornos, compresores, bombas, intercambiadores. Experiencia en montaje de equipos de refinería/petroquímica.
 - **Cañistas / Tuberos (Piping Proceso):** Montaje tuberías proceso (aceros carbono/aleados). Habilidad uniones bridadas/soldadas. Lectura isométricos. Formación UTU Mecánica/Soldadura con experiencia industrial.
 - **Soldadores/as Calificados:** Calificación vigente ASME IX para materiales/WPS de refinería (aceros al carbono/aleados).
 - **Equipo Manejo de Catalizador (Especializado):** Carga del catalizador MtJ bajo condiciones controladas (puede requerir pre-activación o manejo especial).
- **Montaje Eléctrico e I&C (ATEX):** Instalación de equipos/cableado/instrumentación en **áreas clasificadas ATEX exigentes**. Montaje de analizadores en línea (calidad SAF). Pruebas lazos control/SIS. Formación UTU Electricidad/Instrumentación + **Certificación ATEX CompEx**. Habilitación UTE.
- **Montaje Almacenamiento y Despacho SAF:** Montaje tanques almacenamiento SAF (API 650), bombas carga, líneas, sistemas de medición fiscal, potencial conexión a sistemas de despacho de refinería existente.

- **A.3. Comisionado y Puesta en Marcha (Proceso Refino/Químico):**

- **Equipo Multidisciplinar de Comisionado (Exp. Refino/Petroquímica/MtJ):**

- **Rol:** Puesta en marcha segura del proceso de conversión y fraccionamiento.
- **Responsabilidades Clave:** Limpieza/soplado/secado; pruebas presión/fugas; inertización; **activación/preparación catalizadora MtJ**; introducción controlada de metanol feed (y H₂ de refinería si aplica); estabilización de reactores y **columnas de fraccionamiento** (lograr cortes Jet Fuel/Nafta/LPG según diseño); ajuste fino para cumplir especificaciones estrictas de SAF (ASTM D7566); pruebas rendimiento; transferencia a O&M.
- **Capacidades:** Experiencia indispensable (>5-7 años) en comisionado/arranque de **unidades de proceso catalítico y fraccionamiento en refinerías/petroquímicas**. Conocimiento profundo de procesos MtJ o similares (GTL, MTO), catálisis, destilación de hidrocarburos. Metodología rigurosa. Liderazgo en seguridad de procesos.

B. Perfiles para Operación y Mantenimiento (O&M) de Planta MtJ (e-SAF)

Operación continua de una unidad de proceso tipo refinería, integrada potencialmente con ANCAP, enfocada en seguridad, rendimiento y calidad del SAF.

- **B.1. Gestión de Planta y Supervisión:**
 - **Jefe/a de Planta (MtJ/SAF):** Ingeniería Química indispensable. Experiencia >7-10 años gestión unidades de proceso en refinería/petroquímica. Responsable seguridad (PSM), producción SAF en especificación, eficiencia (conversión MeOH, consumo H₂ si aplica, energía), costos OPEX, gestión catalizadora, cumplimiento normativo (ambiental, calidad SAF). Gestión de interfaz con ANCAP (¿suministro H₂?, servicios?).
 - **Supervisor/a de Turno (Producción SAF):** Formación técnica superior/Ing. Química. Experiencia >5 años operador senior refinería/petroquímica. Lidera equipo 24/7, supervisa reactores MtJ y fraccionamiento, coordina O&M/Lab, gestiona PTW, primera respuesta a emergencias.
 - **Supervisor/a de Mantenimiento (Planta Proceso):** Formación técnica superior/Ingeniería (Mec/Eléc). Experiencia >5-7 años supervisión Mantenimiento refinería/petroquímica. Gestiona PM/PdM/CM equipos proceso (reactores, columnas, compresores, hornos, bombas, etc.). Dominio CMMS. Foco seguridad mantenimiento (LOTO, espacios confinados, trabajos en caliente).
- **B.2. Operaciones:**
 - **Operador/a de Sala de Control (CCR SAF):** Formación UTU Química/Procesos. Experiencia >3 años CCR refinería/petroquímica. Manejo experto DCS. Controla **reactores MtJ (T°, P, flujo), columnas fraccionamiento** (perfiles T°, P, niveles, reflujo, calidad cortes), sistemas auxiliares (compresores H₂ si aplica). Gestiona alarmas.
 - **Operador/a de Campo (SAF):** Formación UTU Química/Mecánica. Experiencia campo refinería/petroquímica. Rondas (fugas hidrocarburos/MeOH/H₂, vibraciones, niveles), muestreo seguro hidrocarburos/metanol, operación local válvulas/bombas, preparación equipos LOTO/purgado/limpieza. **Formación obligatoria manejo seguro Metanol e Hidrocarburos.**
 - **Coordinador/a Suministro Feedstock (MeOH / H₂ Refinería):**
 - **Rol:** Asegura recepción continua y en especificación de MeOH (tren desde Durazno) y H₂ (si aplica, desde ANCAP).

- **Responsabilidades Clave:** Coordinación logística recepción/descarga vagones tanque MeOH; gestión almacenamiento intermedio MeOH; interfaz operativa con ANCAP para suministro H₂ (caudal, presión, pureza); monitorización calidad feeds.
- **Capacidades:** Formación técnica/logística. Experiencia en logística de químicos líquidos y/o gases industriales. Conocimiento en operativa ferroviaria y/o interfaz refinería.

- **B.3. Mantenimiento:**

- **Técnico/a Mantenimiento (Multi-skilled E&I / Mecánico - Refino):** Formación UTU Mecánica/Electricidad/Instrumentación. Experiencia >3-5 años Mantenimiento refinería/petroquímica.
- **Mecánico:** Mantenimiento reactores (inspección catalizador/internos en paradas), columnas (internos), compresores, hornos (tubos, quemadores), bombas API, intercambiadores, válvulas control/seguridad.
- **E&I:** Mantenimiento motores/VFDs, instrumentación proceso (analizadores calidad SAF en línea, PT, TT, FT, LT), válvulas control, sistemas control/SIS, detectores F&G (hidrocarburos/metanol/H₂). **Formación ATEX obligatoria.**
- **Formación específica seguridad refinería/química, ATEX, espacios confinados obligatoria.**

- **B.4. Soporte Técnico, Calidad y HSE:**

- **Ingeniero/a de Procesos (MtJ/SAF):** Ing. Química. Experiencia optimización unidades proceso refinería/petroquímica (idealmente conversión catalítica/fraccionamiento). Monitoriza/optimiza **rendimiento catalizador MtJ**, conversión MeOH, selectividad a Jet Fuel, calidad productos/subproductos. Troubleshooting avanzado. Lidera MOC y revisiones PHA.
- **Técnico/a de Laboratorio (Combustibles/Químico):** Formación UTU Química/Laboratorio. Experiencia laboratorio refinería/químico. **Análisis calidad e-SAF según especificaciones aeronáuticas (ASTM D7566 / D1655):** composición, punto de inflamación, congelación, densidad, azufre, etc. Análisis de MeOH feed y corrientes intermedias. Manejo seguro de químicos/hidrocarburos.
- **Coordinador/a HSE (O&M Refino/Químico):** Técnico Prevencionista/Ingeniero con experiencia industria refino/petroquímica. Foco riesgos operativos **Metanol e Hidrocarburos inflamables/tóxicos**, alta T/P. Implementación/auditoría PSM. Planes emergencia química/incendio. Cumplimiento ambiental (emisiones, efluentes). Interfaz HSE con ANCAP si está en el predio.

- **B.5. Logística de Producto Final:**

- **Especialista en Logística y Despacho (e-SAF):**
- **Rol:** Gestiona almacenamiento y entrega del e-SAF.

- **Responsabilidades Clave:** Supervisión parque tanques SAF; planificación/coordinación carga a camiones cisterna o potencial conexión a sistema de despacho de aeropuerto/puerto; aseguramiento cumplimiento normativas **transporte/almacenamiento combustibles aviación**; gestión documentación despacho (Certificados Calidad SAF); interfaz con ANCAP (si hay blending o uso de infraestructura), distribuidores, aeropuerto. Control de inventario.
- **Capacidades:** Formación Logística/Comercio Exterior. Experiencia (>3-5 años) logísticas combustibles (**ideal aviación**) o químicos líquidos. Conocimiento normativa calidad/seguridad de combustibles aviación. Manejo sistemas gestión.

Reflexión sobre Potencial Local (MtJ/e-SAF):

- La operación de una planta tipo MtJ se asemeja mucho a unidades existentes en refinerías. **Existe una base de personal calificado (ingenieros de proceso, operadores, técnicos de mantenimiento E&I/Mec, laboratoristas, especialistas HSE) en Uruguay con experiencia en ANCAP y sectores relacionados, que podrían ser reconducidos o requerirían adaptación/formación específica** en la tecnología MtJ particular y el manejo seguro del metanol como feed.
- La formación técnica de **UTU (Química, Mantenimiento Industrial, Electromecánica, etc.)** es una buena base.
- La **proximidad e integración potencial con ANCAP** es una ventaja significativa para sinergias operativas, de servicios auxiliares, logísticas y potencialmente de personal. El informe *GIZ/DP* podría explorar estas sinergias y necesidades formativas específicas.

Perfiles Ocupacionales Para Construcción Y Operación De Planta e-NH3/UREA

La producción integrada de amoníaco verde (e-NH₃) y urea (~1231 ktpa) en Durazno es estratégica para el sector agrícola nacional y regional, ofreciendo fertilizantes bajos en carbono. Aunque las tecnologías Haber-Bosch (para NH₃) y de síntesis de urea son maduras, su implementación con H₂V y CO₂ biogénico, y la escala de la planta, requieren personal altamente calificado con experiencia en **procesos químicos a alta presión y manejo experto de amoníaco**. La seguridad operativa (PSM) es absolutamente crítica dada la toxicidad y peligrosidad del amoníaco (*GIZ/DP Uruguay Report, 2024; Queensland Hydrogen Roadmap*).

Perfiles para Construcción, Montaje y Puesta en Marcha de Planta e-NH3/UREA

La construcción involucra equipos de muy alta presión (reactores, compresores), sistemas de purificación de gases y manejo de producto final sólido (urea).

- **A.1. Ingeniería de Diseño y Detalle (EPC - Off-Site/Indirecto):**
 - **Equipo de Ingeniería Multidisciplinar (Exp. en Plantas de Amoníaco/Urea):**
 - **Ingenieros/as de Procesos (NH₃/Urea):**
 - **Rol:** Diseña las unidades de síntesis de NH₃ (Haber-Bosch) y Urea.

- **Responsabilidades Clave:** P&IDs detallados; balances masa/energía; **diseño/especificación reactor(es) Haber-Bosch** (alta P/T, catalizador); **diseño loop de síntesis NH₃** (compresión H₂/N₂, separación NH₃, reciclo); **diseño sección de separación de aire (ASU)** para obtener N₂ (si no se suministra externamente); **diseño reactor de síntesis de Urea** (alta P, materiales especiales); **diseño sistemas de descomposición/reciclaje de carbamato**; **diseño sección de acabado de Urea** (evaporación, granulación/prilado); análisis **HAZOP/LOPA** detallado para NH₃/Urea.
- **Capacidades/Formación:** Ing. Química. Experiencia indispensable (>7 años) **diseño plantas de Amoníaco y/o Urea**. Conocimiento profundo Haber-Bosch, síntesis Urea, catálisis, alta presión, separación gases (ASU). Dominio simulación (Aspen HYSYS/Plus). Normas seguridad procesos (API, etc.).
- **Ingenieros/as Mecánicos (Equipos Alta Presión):** Especificación técnica **reactores Haber-Bosch/Urea (ASME VIII Div. 2/3)**; **compresores de gas de síntesis (H₂+N₂) y reciclo (muy alta presión)**; bombas de alta presión (ej. para carbamato); equipos sección acabado (granulador/prilador); tanques almacenamiento NH₃ líquido (refrigerado/presurizado). Conocimiento de materiales **para alta presión y servicio con NH₃/CO₂/carbamato** (corrosión).
- **Ingenieros/as de Tuberías (Piping - Alta Presión):** Diseño 3D; **selección materiales y diseño para tuberías de MUY ALTA PRESIÓN** (loop síntesis NH₃/Urea); **análisis estrés avanzado** (ciclos térmicos/presión); diseño soportes especiales; isométricos para tuberías críticas. Experiencia piping alta presión indispensable.
- **Ingenieros/as Eléctricos / I&C (ATEX/SIS):** Diseño alimentación **grandes compresores**; **diseño áreas clasificadas ATEX** (NH₃ es inflamable/tóxico); **diseño SIS (IEC 61511)** para proteger reactores/compresores; especificación instrumentación (analizadores NH₃/H₂/N₂/CO₂, detectores NH₃), válvulas control/seguridad alta presión. Programación DCS/PLC/SIS.

- **A.2. Construcción y Montaje en Sitio (Planta Química Peligrosa):**

- **Gestión y Supervisión:** Requiere **experiencia mandatoria en construcción plantas Amoníaco/Urea o similar alta presión/toxicidad**. Liderazgo extremo en seguridad.
- **HSE y QA/QC (Foco NH₃/Alta Presión):**
 - **HSE:** Foco en riesgos **Amoníaco (alta toxicidad por inhalación, corrosivo, inflamable en ciertas condiciones)**, **muy alta presión**, CO₂, catalizadores, espacios confinados. Sistema PTW extremadamente riguroso. Planes emergencia específicos para fugas NH₃ (nubes tóxicas). **Formación obligatoria y equipos de protección/rescate específicos para NH₃** para todo el personal expuesto.
 - **QA/QC:** Control exhaustivo **soldaduras/materiales para muy alta presión** (NDT avanzado, trazabilidad); verificación montaje equipos críticos (reactores, compresores HP); pruebas de presión **hidrostática a muy alta presión**; limpieza y secado riguroso de sistemas; inspección instalación ATEX. Inspectores certificados (CWI, NDT Nivel II/III, API).
- **Montaje Mecánico y Piping (Alta Presión):**
 - **Montadores/Millwrights:** Montaje **reactores pesados, compresores H₂/N₂/Syngas/Reciclo de alta presión** (alineación crítica), bombas HP, equipos granulación/prilado. Experiencia en montaje de equipos de alta presión.
 - **Cañistas/Tuberos (Alta Presión):** Montaje experto de **tuberías de alta presión y espesor grueso**, a menudo con materiales especiales/aleados. Habilidad uniones bridadas alta presión (RTJ), soldadura. Lectura isométricos complejos. Formación UTU + experiencia.

- **Soldadores/as Calificados (Alta Presión):** Calificación específica ASME IX vigente para soldar materiales/espesores de alta presión, con calidad radiográfica.
 - **Equipo Manejo de Catalizador (Haber-Bosch):** Carga catalizador Haber-Bosch (hierro) bajo condiciones controladas (pre-reducción, atmósfera inerte).
 - **Montaje Eléctrico e I&C (ATEX/SIS):** Instalación en áreas clasificadas ATEX (NH3). Montaje/conexionados equipos de potencia y control, sistemas SIS críticos, detectores NH3. Formación UTU + Certificación ATEX CompEx.
 - **Montaje Almacenamiento y Despacho (NH3/Urea):** Montaje tanques almacenamiento NH3 líquido (refrigerados -esferas- o presurizados -bullets- cumpliendo normas API/ASME); sistemas de bombeo/carga NH3; sistemas de almacenamiento/ensacado/carga a granel de Urea sólida (silos, cintas transportadoras, sistemas de carga a tren/camión).
- **A.3. Comisionado y Puesta en Marcha (Planta NH3/Urea):**
 - **Equipo Multidisciplinar de Comisionado (Exp. NH3/Urea):**
 - **Rol:** Arranque seguro y estabilización de los procesos Haber-Bosch y Síntesis de Urea.
 - **Responsabilidades Clave:** Limpieza/secado; pruebas presión/fugas alta presión; inertización; **reducción/activación catalizador Haber-Bosch**; introducción controlada N2/H2/CO2; estabilización loops **síntesis NH3 y Urea (muy alta presión/temperatura)**; arranque sistemas auxiliares (ASU, refrigeración NH3); puesta en marcha sección acabado Urea (granulación/prilado); obtención producto en especificación; pruebas rendimiento. Máxima prioridad en seguridad NH3.
 - **Capacidades:** Experiencia indispensable (>7-10 años) comisionado/arranque **plantas Amoníaco y Urea**. Conocimiento profundo procesos, catálisis, alta presión, seguridad NH3. Metodología rigurosa.

B. Perfiles para Operación y Mantenimiento (O&M) de Planta e-NH3/UREA

Operación continua de procesos químicos a muy alta presión con manejo de amoníaco.

- **B.1. Gestión de Planta y Supervisión:**
 - **Jefe/a de Planta (NH3/Urea):** Ingeniería Química indispensable. Experiencia >10 años gestión plantas NH3/Urea o similar alta presión/peligrosidad. Responsable seguridad (PSM riguroso), producción, eficiencia, costos, gestión catalizadores, cumplimiento ambiental/normativo.
 - **Supervisor/a de Turno (Producción NH3/Urea):** Formación técnica superior/Ing. Química. Experiencia >5-7 años operador senior NH3/Urea. Lidera equipo 24/7, supervisa loops síntesis, acabados, coordina O&M/Lab, PTW alta presión/NH3, primera respuesta emergencias NH3.
 - **Supervisor/a de Mantenimiento (Planta NH3/Urea):** Formación técnica superior/Ingeniería (Mec/Eléc). Experiencia >7 años supervisión Mantenimiento plantas alta presión/químicas. Gestiona PM/PdM/CM equipos críticos (reactores HP, compresores HP, bombas HP, etc.). Dominio CMMS. Foco seguridad mantenimiento (LOTO, espacios confinados, manejo NH3).

- **B.2. Operaciones:**

- **Operador/a de Sala de Control (CCR NH3/Urea):** Formación UTU Química/Procesos. Experiencia >5 años CCR proceso químico/alta presión. Manejo experto DCS. Controla **reactores Haber-Bosch y Urea (T°, P, conversiones), compresores HP**, sistemas separación/reciclo, sección acabado Urea. Gestiona alarmas y paradas de emergencia.
- **Operador/a de Campo (NH3/Urea):** Formación UTU Química/Mecánica. Experiencia campo planta química/gas. Rondas (fugas **NH3** con detectores portátiles, vibraciones compresores HP), muestreo seguro NH3/otras corrientes, operación local válvulas HP, preparación equipos LOTO/purgado/inertización. **Formación obligatoria manejo seguro de Amoníaco (toxicidad, corrosividad, EPPs específicos - trajes encapsulados, equipos respiración autónoma ERA).**
- **Coordinador/a Suministro Feeds (H2/CO2/N2):** Interfaz operativo con proveedores/ductos H2/CO2 y ASU (si es interna/cercana); monitorización flujo/calidad feeds; coordinación nominaciones.

- **B.3. Mantenimiento:**

- **Técnico/a Mantenimiento (Multi-skilled E&I / Mecánico - Alta Presión/NH3):** Formación UTU Mecánica/Electricidad/Instrumentación. Experiencia >5 años Mantenimiento plantas alta presión/químicas.
- **Mecánico:** Mantenimiento **compresores H2/N2/Syngas/Reciclo (muy alta presión - requiere alta especialización)**, bombas HP (carbamato), válvulas HP, equipos sección acabado Urea (granulador). Mantenimiento de reactores/equipos en paradas (trabajos en espacios confinados).
- **E&I:** Mantenimiento motores/VFDs, instrumentación proceso (analizadores NH3/Urea, detectores NH3), válvulas control HP, sistemas control/SIS, detectores F&G NH3. **Formación ATEX obligatoria.**
- **Formación específica seguridad química, Amoníaco, ATEX, espacios confinados, alta presión obligatoria.**

- **B.4. Soporte Técnico, Calidad y HSE:**

- **Ingeniero/a de Procesos (NH3/Urea):** Ing. Química. Experiencia optimización plantas NH3/Urea. Monitoriza/optimiza **rendimiento catalizadores (Haber-Bosch)**, eficiencia reactores/loops, consumo energético. Troubleshooting. Lidera MOC y revisiones PHA rigurosas.
- **Técnico/a de Laboratorio:** Formación UTU Química. Experiencia laboratorio químico industrial. Análisis calidad **Amoníaco** (pureza, agua) y **Urea** (N, biuret, humedad, granulometría). Análisis feeds/efluentes. Manejo seguro NH3/reactivos. BPL.
- **Coordinador/a HSE (O&M NH3/Urea):** Técnico Prevencionista/Ingeniero con experiencia industria química/alta peligrosidad. Foco riesgos operativos **Amoníaco (toxicidad severa)**, alta presión. Implementación/auditoría **PSM robusto**. Planes emergencia química (fugas masivas NH3). Cumplimiento ambiental.

- **B.5. Logística de Producto Final:**

- **Especialista en Logística y Despacho (Urea/NH3):** Gestiona almacenamiento Urea sólida (silos) y/o NH3 líquido (tanques refrigerados/presurizados); coordina **carga a ferrocarril/camión** (Urea granel/bolsas, NH3 líquido); cumplimiento normativas transporte mercancías peligrosas (NH3); interfaz operador ferroviario, puerto, clientes; control inventario. Experiencia logística fertilizantes/químicos peligrosos.

Reflexión sobre Potencial Local (e-NH3/Urea):

- Uruguay tiene industria de fertilizantes y experiencia agrícola, pero probablemente **no experiencia en operación/mantenimiento de plantas de síntesis de Amoníaco/Urea a esta escala y presión.**
- La base formativa (Ing. Química UDELAR, Técnicos UTU Química/Mantenimiento) es válida, pero se requerirá **formación especializada MUY INTENSIVA y específica** en estos procesos y, sobre todo, en **seguridad con Amoníaco y Alta Presión.**
- Dada la alta peligrosidad, es probable que roles clave de operación, mantenimiento especializado (compresores HP) y comisionado requieran **experiencia internacional significativa** al inicio, con un plan robusto de **transferencia de conocimiento y capacitación** para personal uruguayo, posiblemente en colaboración con UTEC, UDELAR e INEFOP (*GIZ/DP Report*).

Damos por finalizadas las secciones 8.6 (e-SAF) y 8.7 (e-NH3/UREA) tal como las desarrollamos.

Perfiles Ocupacionales para Construcción y Operación de Plantas de Captura de CO2 en Plantas de Celulosa.

Para esta sección, nos basaremos en:

- La captura de aprox. **6.1-6.2 Mtpa de CO2 biogénico** de las tres plantas de celulosa (UPM 1 Fray Bentos, UPM 2 Durazno/Paso de los Toros, Montes del Plata en Colonia) para alimentar las plantas de e-Metanol y Urea.
- La tecnología más probable para captura post-combustión en estas fuentes es la **absorción química con aminas**, aunque otras tecnologías podrían ser consideradas.
- La información disponible en los documentos sobre **Captura de Carbono (CCS/CCU)**, ingeniería de procesos, y habilidades generales, adaptada al contexto de instalación y operación de unidades de captura química en sitios industriales existentes. El informe clave aquí es el **"Análisis-de-la-disponibilidad-de-CO2-H2V-Uruguay.pdf"** (referencia conceptual) y potencialmente informes de **IEAGHG** o **Global CCS Institute**.

Perfiles Ocupacionales para Construcción Y Operación De Plantas de Captura de CO2 (En Plantas De Celulosa)

La captura de aprox. **7.5 Mtpa de CO2 biogénico** desde las chimeneas de las tres grandes plantas de celulosa del país es un pilar fundamental para asegurar la sostenibilidad y el carácter "e-" de los derivados producidos (metanol, urea, SAF). Aunque existen diversas tecnologías, la **captura post-combustión (PCC) mediante absorción química con solventes (ej. aminas)** es una de las más maduras para este tipo de fuentes industriales (*Análisis-de-la-disponibilidad-de-CO2-H2V-Uruguay.pdf*; *Global CCS Institute Reports*). La construcción y operación de estas unidades de captura, probablemente instaladas como proyectos "Brownfield" dentro o junto a las plantas de celulosa existentes, requerirá personal con experiencia en procesos químicos, manejo de sustancias químicas específicas y una fuerte coordinación con la operación de la planta anfitriona.

A. Perfiles para Construcción, Montaje y Puesta en Marcha de Plantas de Captura de CO2 (PCC)

La construcción implica montar equipos de proceso químico (columnas de absorción/regeneración, intercambiadores, bombas) e integrarlos con los ductos de gases de combustión de la planta de celulosa y con los sistemas de compresión/licuefacción y transporte del CO2 capturado. Se requiere una gestión rigurosa de SIMOPS (Operaciones Simultáneas) si la planta de celulosa sigue operando.

- **A.1. Ingeniería de Diseño y Detalle (EPC - Off-Site/Indirecto):**
 - **Equipo de Ingeniería Multidisciplinar (Exp. en Procesos Químicos/Gas/Captura CO2):**
 - **Ingenieros/as de Procesos (Captura CO2):**
 - *Rol:* Diseña la unidad de captura basada en tecnología licenciada (ej. aminas).
 - *Responsabilidades Clave:* P&IDs detallados; balances masa/energía; **diseño/simulación columna de absorción y regeneración (stripper)**; diseño sistema de recuperación de calor (muy importante para eficiencia energética); especificación del solvente (amina) y sistema de gestión/filtración del mismo; diseño sistemas de pre-tratamiento de gases de combustión (ej. eliminación de SOx/NOx si es necesario para proteger la amina); análisis **HAZOP/LOPA** (riesgos de aminas corrosivas/volátiles, CO2 alta concentración).
 - *Capacidades/Formación:* Ing. Química. Experiencia (>5 años) diseño plantas proceso químico, idealmente separación de gases, absorción química o captura de CO2. Dominio simulación (Aspen HYSYS/Plus). Conocimiento de corrosión por aminas.
 - **Ingenieros/as Mecánicos (Equipos Proceso Químico):** Especificación **columnas de absorción/stripping** (materiales resistentes a corrosión por aminas/CO2 húmedo), **rehervidores** (requieren vapor de la planta anfitriona), intercambiadores de calor (optimizados para recuperación térmica), bombas para solvente (aminas), **compresores/licuefactores de CO2** (si aplica en esta etapa). Códigos ASME VIII/B31.3.
 - **Ingenieros/as de Tuberías (Piping - Proceso Químico):** Diseño 3D; **selección materiales resistentes a corrosión por aminas/CO2 húmedo** (ej. aceros inoxidables específicos); análisis estrés (especialmente en líneas de vapor/alta T); diseño soportes; isométricos.

- **Ingenieros/as Eléctricos / I&C:** Diseño alimentación eléctrica (bombas grandes, compresores CO₂); diseño áreas clasificadas ATEX (si aplica por solventes/gases); diseño SIS; especificación instrumentación (analizadores CO₂, T, P, F, L, control de pH/corrosión). Programación DCS/PLC.

- **A.2. Construcción y Montaje en Sitio (Entorno Industrial Existente):**

- **Gestión y Supervisión:** Requiere **experiencia mandatoria construcción proyectos Brownfield** dentro de plantas industriales operativas. Gestión experta **SIMOPS** y coordinación total con operaciones/seguridad de la planta de celulosa anfitriona.

- **HSE y QA/QC (Foco Químico/Integración):**

- **HSE:** Foco en riesgos **manejo de solventes (aminas - corrosivas/irritantes)**, CO₂ (asfixia en altas concentraciones), integración con gases de combustión calientes, trabajos en altura (columnas), espacios confinados. **Sistema PTW integrado** con planta anfitriona. Planes emergencia química. Formación específica.

- **QA/QC:** Inspección soldaduras (NDT) equipos/tuberías (materiales especiales); control montaje internos columnas; verificación materiales; pruebas presión/fugas; control limpieza; inspección instalación ATEX (si aplica).

- **Montaje Mecánico y Piping:**

- **Montadores/Millwrights:** Montaje **columnas de absorción/stripping** (a menudo altas), intercambiadores, bombas, compresores CO₂. Experiencia montaje plantas químicas.

- **Cañistas/Tuberos:** Montaje tuberías proceso (aceros especiales). Habilidad uniones bridadas/soldadas. Lectura isométricos. Formación UTU.

- **Soldadores/as Calificados:** Calificación vigente ASME IX para materiales (ej. SS 316L u otros resistentes a corrosión).

- **Montaje Eléctrico e I&C:** Instalación equipos/cableado/instrumentación en entorno industrial. Conexión de analizadores/sensores. Pruebas lazos control.

- **Integración con Planta Existente:** Trabajos específicos y críticos para conectar los ductos de gases de combustión a la unidad de captura y retornar los gases tratados (tie-ins), usualmente realizados durante paradas programadas de la planta anfitriona. Requiere planificación muy detallada y supervisión experta.

- **A.3. Comisionado y Puesta en Marcha (Unidad de Captura Química):**

- **Equipo Multidisciplinar de Comisionado (Exp. Procesos Químicos/Separación):**

- **Rol:** Arranque seguro y eficiente de la unidad de absorción/regeneración.

- **Responsabilidades Clave:** Limpieza/lavado químico de sistemas; pruebas hidráulicas/fugas; inertización; **primera carga y circulación del solvente (amina)**; introducción controlada de gases de combustión; estabilización de ciclos de absorción/regeneración (control T, P, flujos); **optimización para alcanzar eficiencia de captura de CO₂ y pureza requerida**; pruebas de rendimiento; integración operativa con planta anfitriona; transferencia a O&M.

- **Capacidades:** Experiencia (>5 años) comisionado/arranque plantas químicas, idealmente con procesos de absorción/destilación/separación de gases. Conocimiento de manejo seguro de aminas u otros solventes químicos. Metodología rigurosa.

B. Perfiles para Operación y Mantenimiento (O&M) de Plantas de Captura de CO₂ (PCC)

Operación continua de una unidad de proceso químico integrada a una planta industrial mayor.

- **B.1. Gestión y Supervisión:**

- **Jefe/a de Unidad de Captura CO₂:** (Podría ser un rol dentro de la estructura de la planta de celulosa o un equipo dedicado del proveedor de CO₂). Ingeniería Química/Procesos. Experiencia en gestión de plantas químicas. Responsable seguridad, eficiencia captura, calidad CO₂, costos OPEX (principalmente energía para regeneración y consumo/reposición de solvente), cumplimiento ambiental, interfaz con planta anfitriona.
- **Supervisor/a de Turno (Producción CO₂):** Formación técnica superior/Ing. Química. Experiencia operador senior proceso químico. Lidera equipo 24/7, supervisa ciclo absorción/regeneración, coordina O&M/Lab, gestiona PTW, primera respuesta emergencias (fugas amina/CO₂).

- **B.2. Operaciones:**

- **Operador/a de Sala de Control (CCR Captura CO₂):** Formación UTU Química/Procesos. Experiencia CCR proceso continuo. Manejo DCS. Controla **columnas absorción/regeneración (T°, P, niveles, flujos solventes/gas), rehervidor (consumo vapor)**, sistemas de filtración/recuperación de solvente, analizadores CO₂ (entrada/salida/producto). Gestiona alarmas.
- **Operador/a de Campo (Captura CO₂):** Formación UTU Química/Mecánica. Experiencia campo planta química. Rondas (fugas amina/CO₂/vapor, corrosión), **muestreo seguro solvente (amina)**, operación local bombas/válvulas, preparación equipos LOTO/purgado. **Formación obligatoria manejo seguro Aminas/CO₂.**

- **B.3. Mantenimiento:**

- **Técnico/a Mantenimiento (Multi-skilled E&I / Mecánico - Planta Química):** Formación UTU Mecánica/Electricidad/Instrumentación. Experiencia (>3-5 años) Mantenimiento industrial químico.
- **Mecánico:** Mantenimiento **bombas de solvente** (aminas, pueden ser corrosivas), intercambiadores (ensuciamiento/corrosión), columnas (inspección internos en paradas), válvulas control/seguridad.
- **E&I:** Mantenimiento motores/VFDs, instrumentación proceso (analizadores CO₂, pH, T, P, F, L), válvulas control, sistemas control/SIS, detectores gas (Aminas/CO₂ si aplica). Formación ATEX si aplica.
- **Formación específica seguridad química (Aminas), espacios confinados obligatoria.**

- **B.4. Soporte Técnico, Calidad y HSE:**

- **Ingeniero/a de Procesos (Captura CO₂):** Ing. Química. Experiencia en optimización procesos separación química/absorción. Monitoriza/optimiza **eficiencia de captura, consumo energético (vapor/electricidad), degradación/pérdida de solvente (amina)**. Troubleshooting. Lidera MOC y revisiones PHA.

- **Técnico/a de Laboratorio:** Formación UTU Química. Experiencia laboratorio químico industrial. Análisis **concentración/carga de la amina**, niveles de degradación, impurezas. Análisis pureza CO2 producto. Control de efluentes. Manejo seguro aminas/reactivos.
- **Coordinador/a HSE (O&M Captura CO2):** Técnico Prevencionista/Ingeniero con experiencia industria química. Foco riesgos operativos **Aminas (corrosividad, toxicidad por inhalación), CO2 (asfixia)**. PSM. Planes emergencia química coordinados con planta anfitriona. Cumplimiento ambiental (emisiones aminas - "slip", efluentes).

Reflexión sobre Potencial Local (Captura CO2):

- La operación de unidades de captura química es **nueva para Uruguay** a esta escala.
- La **base de personal técnico y de ingeniería con experiencia en las propias plantas de celulosa** (procesos químicos, manejo de vapor, tratamiento de gases/efluentes) es **altamente relevante y transferible**, pero requerirá **formación específica en la tecnología de captura seleccionada (ej. proceso con aminas)** y sus riesgos asociados.
- La **formación técnica de UTU (Química, Mantenimiento)** es una buena base.
- Es probable que la operación inicial requiera **soporte intensivo del licenciante/proveedor** de la tecnología de captura, con un plan de capacitación para el personal local. El informe *GIZ/DP* podría indicar si se prevé alguna iniciativa formativa específica en CCUS.

Perfiles Ocupacionales para Construcción y Operación De Ductos De Hidrógeno (Hidroductos)

La infraestructura de transporte de H2V mediante ductos dedicados (hidroductos) es un componente logístico clave y tecnológicamente específico del Escenario 1. Implica la construcción y operación de tuberías diseñadas para transportar hidrógeno gaseoso a presión (probablemente entre 30 y 100 bar, según diseño) desde los polos de producción (Noroeste) hasta las plantas de derivados (Durazno, Paysandú). La construcción se asemeja a la de gasoductos, pero requiere **consideraciones especiales de materiales, soldadura, pruebas y seguridad debido a las propiedades del hidrógeno** (molécula pequeña, potencial de fragilización de aceros, amplio rango de inflamabilidad). La operación requiere sistemas de monitoreo y mantenimiento específicos para asegurar la integridad y seguridad del transporte. Documentos como la hoja de ruta de Queensland (*Queensland Hydrogen Roadmap*) y análisis de cadenas de valor (*IRENA H2 Value Chains*) resaltan la importancia de esta infraestructura.

Perfiles para Construcción, Instalación y Puesta en Marcha de Hidroductos

Esta fase involucra la ingeniería de detalle, la gestión de permisos y derechos de paso, la construcción a lo largo del trazado (a menudo en zonas rurales), y las pruebas finales.

- **A.1. Ingeniería de Diseño y Detalle (EPC o Consultora Especializada en Ductos):**
Equipo de Ingeniería Multidisciplinar (Exp. en Diseño de Gasoductos/Hidroductos):
 - **Ingeniero/a de Procesos/Mecánico (Ductos):**
 - **Rol:** Define los parámetros operativos y especificaciones técnicas del ducto.
 - **Responsabilidades Clave:** Cálculos hidráulicos (caída de presión, velocidad de flujo, diámetro óptimo); definición de presión y temperatura de operación; especificación de estaciones de compresión/regulación intermedias (si aplica); análisis de transitorios; desarrollo de filosofía de

operación y mantenimiento; participación en HAZOP/análisis de riesgos específicos para ductos de H₂.

- **Capacidades/Formación:** Ing. Química o Mecánica. Experiencia (>5 años) en diseño hidráulico y de procesos de gasoductos o ductos de líquidos. Conocimiento de software de simulación de flujo en ductos. Comprensión de termodinámica de gases.

- **Ingeniero/a de Materiales / Corrosión (H₂ Service):**

- **Rol:** Selecciona los materiales adecuados para el ducto y sus componentes para servicio con hidrógeno.

- **Responsabilidades Clave:** **Selección del acero de la tubería** (grado, tenacidad) y recubrimientos internos/externos considerando la **prevención de la fragilización por hidrógeno** (hydrogen embrittlement) según normativas (ej. ASME B31.12); especificación de materiales para válvulas, bridas, accesorios; definición de planes de control de corrosión.

- **Capacidades/Formación:** Ing. de Materiales o Mecánica con especialización/experiencia (>5 años) en selección de materiales y corrosión para gasoductos, idealmente con conocimiento específico de efectos del H₂ en aceros. Conocimiento de normas API 5L, ASME B31.12, ISO 11114.

- **Ingeniero/a Civil / Geotécnico / Trazado:**

- **Rol:** Define el trazado óptimo y diseña las obras civiles asociadas.

- **Responsabilidades Clave:** Selección y relevamiento detallado de la traza del ducto (considerando topografía, geotecnia, cruces de ríos/carreteras/ferrocarril, aspectos ambientales y sociales, derechos de paso); diseño de zanjas, protección de cruces especiales, control de erosión; análisis geotécnico para estabilidad en diferentes terrenos.

- **Capacidades/Formación:** Ing. Civil o Agrimensor. Experiencia en diseño de trazado y obras civiles para ductos lineales o infraestructura similar. Manejo de software GIS y CAD. Conocimiento de estudios geotécnicos.

- **Ingeniero/a Eléctrico / I&C (Ductos):** Diseño de sistemas de protección catódica (para control de corrosión externa); diseño de sistemas de alimentación eléctrica para estaciones de válvulas/compresión; diseño de sistemas SCADA para monitoreo remoto (presión, flujo, temperatura, detección de fugas) y operación de válvulas de bloqueo; diseño de red de comunicaciones (fibra óptica a lo largo del ducto).

- **Especialista en Permitting y Derechos de Paso (Servidumbres):** Gestión compleja de permisos ambientales, de construcción y, crucialmente, negociación y obtención de los derechos de paso (servidumbres) con propietarios de terrenos a lo largo de cientos de kilómetros. Requiere perfil legal/negociador con experiencia en infraestructura lineal.

- **A.2. Construcción e Instalación en Campo:**

- **Gestión y Supervisión (Empresa Constructora de Ductos):**

- **Gerente de Construcción / jefe de Tramo:** Responsable de la ejecución de un tramo del ducto. Experiencia mandatoria en construcción de gasoductos. Liderazgo en seguridad (trabajos de excavación, izaje, soldadura, espacios confinados si aplica).

- **Supervisores/as de Frente (Apertura Pista, Soldadura, Bajada y Tapada, Pruebas):** Supervisan las cuadrillas especializadas en cada etapa del tendido del ducto.

- **HSE y QA/QC (Foco Ductos/H₂):**

- **HSE:** Foco en riesgos de **construcción lineal** (maquinaria pesada, excavaciones, cruces, trabajo a la intemperie), **soldadura**, **pruebas de alta presión**, y **seguridad H₂** durante pruebas finales.

Gestión ambiental de la traza (polvo, erosión, residuos). Relacionamiento comunitario a lo largo de la traza.

- **QA/QC:** Control de calidad de **tuberías y recubrimientos** (recepción), **soldaduras de campo** (NDT 100% - usualmente UT automático y/o RT), pruebas hidrostáticas de tramos, control de instalación de protección catódica, inspección de cruces especiales. Inspectores certificados (CWI, ASNT NDT Nivel II, Inspector de Recubrimientos NACE).
- **Oficios Calificados (Construcción de Ductos):**
 - **Operadores/as de Maquinaria Pesada (Ductos):** Operación de **tiendetubos (sidebooms)**, excavadoras grandes, zanjadoras, equipos de relleno/compactación, grúas para válvulas/estaciones. Experiencia en tendido de ductos es un plus.
 - **Soldadores/as Calificados (Ductos - descendente/automática):** **Calificación específica** según API 1104 o ASME IX para soldadura de tuberías de acero al carbono/baja aleación, a menudo con técnicas **semiautomáticas (FCAW, GMAW) o automáticas** para alta productividad y calidad en campo.
 - **Curvadores/as de Tubos:** Operan máquinas curvadoras en frío para adaptar la tubería al terreno.
 - **Montadores / Alineadores de Tubería:** Preparan y alinean los tubos para la soldadura.
 - **Aplicadores/as de Revestimiento (Juntas):** Aplican el revestimiento anticorrosivo en las juntas soldadas en campo.
 - **Equipo de Bajada y Tapada:** Operan tiendetubos y equipos para bajar cuidadosamente la tubería a la zanja y taparla.
 - **Electricistas / Instrumentistas (Estaciones):** Montaje de equipos E&I en estaciones de válvulas de bloqueo, estaciones de compresión/regulación (si aplican), y sistemas de protección catódica y SCADA. Formación UTU.
- **A.3. Pruebas Finales y Puesta en Marcha:**
 - **Equipo de Pruebas Hidrostáticas:** Realiza el llenado de tramos del ducto con agua, presurización a alta presión (superior a la de operación) y monitoreo de fugas/resistencia según códigos (ASME B31.12). Requiere bombas de alta presión, registradores calibrados y procedimientos seguros.
 - **Equipo de Secado e Inertización:** Una vez aprobada la prueba hidrostática, se vacía el agua y se seca internamente el ducto (con aire seco o N₂) y se inertiza con Nitrógeno antes de la introducción de H₂.
 - **Equipo de Comisionado H₂:** Introducción controlada de H₂ ("gas-in"), presurización gradual, verificación de sistemas SCADA y detección de fugas bajo operación inicial. Coordinación con planta de electrólisis (productor) y planta de derivados (receptor). Requiere Ingenieros/Técnicos con experiencia en comisionado de gasoductos y **formación en seguridad H₂**.

B. Perfiles para Operación y Mantenimiento (O&M) de Hidroductos

Asegurar la integridad, seguridad y disponibilidad del ducto durante su vida útil.

- **B.1. Gestión y Supervisión O&M:**
 - **Jefe/a de Operación y Mantenimiento de Ductos:** responsable general de la operación segura y fiable del sistema de transporte de H₂. Gestión de personal O&M, presupuesto, integridad del ducto, cumplimiento normativo, relación con stakeholders (productores H₂, consumidores

derivados, propietarios terrenos). Ingeniería con experiencia (>10 años) en O&M de gasoductos/oleoductos.

- **Supervisor/a de Operaciones / Despacho:** Supervisa la operación remota (SCADA), coordina nominaciones/balances de H₂, gestiona transitorios operativos, coordina respuestas a emergencias. Experiencia en despacho/control de ductos.
- **Supervisor/a de Mantenimiento / Integridad:** Planifica y supervisa todas las actividades de mantenimiento preventivo, predictivo y correctivo, y los programas de inspección para asegurar la integridad del ducto. Experiencia en mantenimiento/integridad de ductos.

- **B.2. Operaciones y Monitoreo Remoto:**

- **Operador/a de Sala de Control (SCADA Ductos):** Monitoreo 24/7 de presiones, flujos, temperaturas, estado de válvulas de bloqueo remotas, sistemas de detección de fugas (si existen); coordinación con operadores de plantas conectadas; ejecución de maniobras remotas; registro de eventos. Formación técnica con experiencia en SCADA de ductos.

- **B.3. Mantenimiento e Integridad del Ducto:**

- **Técnico/a de Mantenimiento de Ductos (Patrullaje/Mecánico):**

- **Rol:** Realiza inspecciones visuales y mantenimiento básico a lo largo de la traza.

- **Responsabilidades Clave:** Patrullaje regular de la traza (terrestre/aéreo) buscando signos de daño, erosión, actividades de terceros no autorizadas; mantenimiento de señalización y marcadores; mantenimiento mecánico menor en estaciones de válvulas (lubricación, ajustes).

- **Capacidades:** Formación técnica (Mecánica). Experiencia en patrullaje/mantenimiento de ductos. Carnet de conducir. Capacidad de trabajo autónomo en campo.

- **Técnico/a de Integridad / Inspección (NDT):**

- **Rol:** Realiza inspecciones avanzadas para evaluar la integridad del ducto.

- **Responsabilidades Clave:** Ejecución de inspecciones internas con "**chanchos inteligentes**" (**Intelligent Pigs - MFL, UT**) para detectar corrosión, defectos, abolladuras; ejecución de inspecciones externas (NDT como UT) en puntos específicos; análisis de resultados de inspección; apoyo en evaluación de integridad (Fitness for Service - FFS).

- **Capacidades:** Formación técnica con **certificaciones avanzadas en NDT (UT Nivel II/III)** y experiencia específica en inspección de ductos. Conocimiento de técnicas de limpieza e inspección interna de ductos.

- **Técnico/a de Protección Catódica:**

- **Rol:** Mantiene el sistema que previene la corrosión externa.

- **Responsabilidades Clave:** Mediciones periódicas de potenciales tubo-suelo; inspección y mantenimiento de rectificadores y ánodos de protección catódica; diagnóstico y corrección de problemas del sistema.

- **Capacidades:** Formación técnica (Eléctrica) con **certificación/experiencia específica en Protección Catódica** (ej. NACE CP Technician).

- **Técnico/a de Mantenimiento E&I (Estaciones):** Mantenimiento de válvulas motorizadas, actuadores, instrumentación (P, T, F), sistemas SCADA locales, sistemas de detección de

fugas/fuego en estaciones. Formación UTU (Electricidad/Instrumentación) + ATEX (si aplica en estaciones).

- **Equipo de Reparación de Ductos (Potencialmente Contratista Especializado):** Para reparaciones mayores que impliquen excavación, corte, soldadura y reemplazo de secciones del ducto, siguiendo procedimientos específicos y seguros (puede requerir inertización y manejo de H2 residual). Requiere soldadores y montadores calificados para ductos.
- **B.4. Soporte Técnico y HSE:**
 - **Ingeniero/a de Integridad de Ductos:** responsable del programa de gestión de integridad basado en riesgo (RBI), análisis de resultados de inspección, evaluación FFS, planificación de reparaciones o reemplazos, actualización de planes de mantenimiento. Ingeniería (Mecánica/Materiales) con experiencia (>5 años) en integridad de ductos (API 1160, ASME B31.8S). Certificaciones API (ej. 1169) deseables.
 - **Ingeniero/a de Operaciones / Despacho (H2):** Optimiza el transporte de H2, gestiona balances, coordina con usuarios, realiza simulaciones de flujo. Ing. Química/Mecánica con experiencia en operación/simulación de ductos.
 - **Coordinador/a HSE (Ductos):** Foco en riesgos operativos (fugas H2, seguridad pública a lo largo de la traza, trabajos de mantenimiento en línea), planes de emergencia específicos para ductos, cumplimiento normativo (UNIT u otras aplicables a transporte H2).

Reflexión sobre Potencial Local (Ductos H2):

- Uruguay tiene **experiencia en construcción y O&M de gasoductos** (ej. Gasoducto Cruz del Sur, redes de distribución). **Muchas de las habilidades son directamente transferibles** (gestión de proyectos lineales, obra civil, soldadura de tuberías API 1104, operación SCADA, mantenimiento mecánico/E&I, patrullaje).
- Los **desafíos específicos del H2** requerirán **formación adicional** y adaptación de procedimientos:
 - **Materiales:** Conocimiento sobre fragilización por hidrógeno y selección/manejo de aceros adecuados.
 - **Soldadura y QA/QC:** Posiblemente procedimientos de soldadura y criterios de aceptación NDT más estrictos que para gas natural.
 - **Pruebas de Fugas:** Uso de Helio u otras técnicas de alta sensibilidad.
 - **Seguridad H2:** Formación específica sobre detección, riesgos de ignición y respuesta a emergencias con H2 para todo el personal O&M.
- El informe *GIZ/DP* y *MTSS* podrían indicar si la formación existente (UTU, soldadores) cubre ya aspectos de alta calidad requeridos o si se necesita especialización. La experiencia de empresas constructoras y operadoras de gasoductos en Uruguay será una base valiosa.

Perfiles Ocupacionales Para Construcción Y Operación De Ductos De CO2

El transporte seguro y eficiente del CO2 capturado (~6.2 Mtpa) desde las plantas de celulosa hasta las plantas de síntesis en Durazno y Paysandú es otro componente logístico vital. Se contempla el uso de **ductos dedicados**. Para optimizar el transporte, el CO2 se maneja típicamente a **alta presión**, en fase **densa o supercrítica** (usualmente >74 bar y >31 °C), lo que requiere consideraciones específicas de diseño, materiales, operación y seguridad, distintas, pero

con similitudes a los ductos de H₂ o gas natural (*Global CCS Institute Reports; IEAGHG Reports; Ausenco, 2024*).

A. Perfiles para Construcción, Instalación y Puesta en Marcha de Ductos de CO₂

Similar a la construcción de otros ductos, pero con atención a materiales y procedimientos para CO₂ a alta presión, potencialmente con impurezas.

- **A.1. Ingeniería de Diseño y Detalle (EPC o Consultora Especializada en Ductos):**
 - **Equipo de Ingeniería Multidisciplinar (Exp. en Ductos de CO₂/Gas):**
 - **Ingeniero/a de Procesos/Mecánico (Ductos CO₂):**
 - *Rol:* Define parámetros operativos y diseño hidráulico/mecánico.
 - *Responsabilidades Clave:* Cálculos hidráulicos para flujo de CO₂ denso/supercrítico (caída P, T°, velocidad); definición P/T operación (mantener fase densa/supercrítica); especificación **estaciones de recompresión/bombeo** y calentamiento/enfriamiento (si necesarias); análisis de transitorios (arranque, parada, despresurización segura - CO₂ frío); desarrollo filosofía O&M; análisis de riesgos (**HAZOP/QRA ductos CO₂** - asfixia, baja T en fugas, corrosión).
 - *Capacidades/Formación:* Ing. Química/Mecánica. Experiencia (>5 años) diseño hidráulico/proceso ductos gas/líquidos a alta presión, idealmente CO₂. Software simulación flujo multifase/denso. Conocimiento en termodinámica CO₂.
 - **Ingeniero/a de Materiales / Corrosión (CO₂ Service):**
 - *Rol:* Selecciona materiales resistentes a CO₂, especialmente si contiene impurezas.
 - *Responsabilidades Clave:* **Selección acero tubería** (grado API 5L) y recubrimientos considerando **corrosión por CO₂ húmedo (ácido carbónico)** y el efecto de impurezas (SO_x, NO_x, O₂ si provienen de captura); especificación materiales válvulas/accesorios resistentes a CO₂ denso/baja T (en despresurización). Normas relevantes (ej. ISO 27913, DNV standards).
 - *Capacidades/Formación:* Ing. Materiales o Mec/Quím con especialización/experiencia (>5 años) en **corrosión en ambientes CO₂** (sector O&G, CCS). Conocimiento metalurgia aceros al carbono/aleados.
 - **Ingeniero/a Civil / Geotécnico / Trazado:** Selección/relevamiento detallado traza; diseño zanjas, protección cruces especiales; control erosión; análisis geotécnico. Ing. Civil/Agrimensor exp. diseño trazado infraestructura lineal. Software GIS/CAD.
 - **Ingeniero/a Eléctrico / I&C (Ductos):** Diseño alimentación eléctrica estaciones bombeo/compresión; diseño sistemas **SCADA para monitoreo remoto** (P, T, F, detección fugas CO₂); diseño red comunicaciones.
 - **Especialista en Permitting y Derechos de Paso (Servidumbres):** Gestión permisos ambientales/construcción; negociación servidumbres. Perfil legal/negociador exp. infraestructura lineal.
- **A.2. Construcción e Instalación en Campo:**
 - **Gestión y Supervisión (Empresa Constructora de Ductos):** Gerente Construcción / Jefe Tramo: Experiencia mandatoria (>7-10 años) construcción gasoductos/oleoductos. Liderazgo seguridad (alta presión, CO₂). Supervisores/as de Frente.
 - **HSE y QA/QC (Foco Ductos/CO₂):**
 - **HSE:** Foco riesgos construcción lineal, soldadura, **pruebas alta presión hidrostática, seguridad CO₂** (asfixia en áreas bajas durante pruebas/fugas, riesgo baja T/quemaduras frías en

despresurización). Gestión ambiental/social traza. Técnico Prevencionista exp. obras lineales/proceso.

- **QA/QC:** Control calidad tuberías/recubrimientos; **control exhaustivo soldaduras campo** (NDT 100% según API 1104/ASME B31.3/B31.4); **supervisión pruebas hidrostáticas alta presión**; inspección protección catódica (si aplica); dossier calidad. Inspectores certificados (CWI, ASNT NDT II, NACE, API 1169).
- **Oficios Calificados (Construcción de Ductos):** (Similares a Hidroductos, con foco en calidad para alta presión).
- Operadores de Maquinaria Pesada (Tiendetubos, etc.).
- **Soldadores/as Calificados (Ductos - API 1104 / ASME IX):** Calificación específica para soldadura de tuberías acero al carbono/baja aleación. Calidad crítica para alta presión.
- Curvadores, Montadores/Alineadores, Aplicadores Revestimiento, Equipo Bajada/Tapada.
- Electricistas / Instrumentistas (Estaciones). Formación UTU.

- **A.3. Pruebas Finales y Puesta en Marcha:**

- **Equipo de Pruebas Hidrostáticas:** Ejecución segura presurización (a niveles > P operación CO2 denso) y monitoreo según códigos (ej. ASME B31.4).
- **Equipo de Secado e Inertización:** Vaciado, **secado interno MUY riguroso** (humedad + CO2 = corrosión) e inertización N2.
- **Equipo de Comisionado CO2 (Gas-in/Liquid-in):** Procedimiento específico para **introducción controlada de CO2**, presurización gradual hasta condiciones densas/supercríticas, verificación sistemas SCADA/detección fugas, pruebas funcionales válvulas. Coordinación con plantas captura/receptoras. Requiere Ing./Técnicos exp. comisionado ductos gas/líquidos peligrosos y **formación seguridad CO2**.

B. Perfiles para Operación y Mantenimiento (O&M) de Ductos de CO2

Asegurar la integridad, seguridad y disponibilidad del transporte de CO2 a alta presión.

- **B.1. Gestión y Supervisión O&M:**

- **Jefe/a de O&M de Ductos CO2:** Responsable operación segura/fiable. Gestión personal O&M, presupuesto, **programa gestión integridad (PIM)** adaptado a CO2 (corrosión interna/externa, fractura), cumplimiento normativo, stakeholders. Ingeniería exp. (>10 años) O&M gasoductos/oleoductos/ductos CO2.
- **Supervisor/a de Operaciones / Despacho CO2:** Supervisa operación remota (SCADA), coordina nominaciones/balances CO2, gestiona transitorios, coordina emergencias (fugas CO2). Exp. despacho/control ductos.
- **Supervisor/a de Mantenimiento / Integridad:** Planifica/supervisa mantenimiento e inspecciones integridad (corrosión, defectos). Exp. mantenimiento/integridad ductos.

- **B.2. Operaciones y Monitoreo Remoto:**

- **Operador/a de Sala de Control (SCADA Ductos CO2):** Monitoreo 24/7 P, T, F, estado válvulas, **sistemas detección fugas CO2** (balance masa, sensores puntuales si aplica); coordinación

operadores plantas; ejecución maniobras remotas; registro eventos. Formación técnica exp. SCADA ductos.

- **B.3. Mantenimiento e Integridad del Ducto:**

- **Técnico/a de Mantenimiento de Ductos (Patrullaje/Mecánico):** Patrullaje regular traza buscando anomalías (fugas CO₂ - pueden ser difíciles de detectar visualmente, corrosión externa, actividad terceros); mantenimiento señalización; mantenimiento mecánico menor estaciones válvulas/bombeo. Formación técnica (Mecánica). Exp. patrullaje de ductos. Carnet de conducir. **Formación seguridad CO₂.**
- **Técnico/a de Integridad / Inspección (NDT/ILI):** Ejecución inspecciones internas (ILI - **Intelligent Pigs** con MFL/UT para detectar corrosión interna/externa, defectos) y externas NDT (UT); análisis preliminar resultados. Formación técnica + **certificaciones avanzadas NDT (UT Nivel II/III)** y/o **experiencia específica operación ILI ductos.**
- **Técnico/a de Protección Catódica:** Mantenimiento sistema prevención corrosión externa. Formación técnica (Eléctrica) + **certificación/experiencia Protección Catódica.**
- **Técnico/a de Mantenimiento E&I (Estaciones):** Mantenimiento válvulas motorizadas, bombas/compresores CO₂, actuadores, instrumentación, SCADA locales. Formación UTU (Electricidad/Instrumentación).
- **Equipo de Reparación de Ductos (Contratista Especializado):** Para reparaciones mayores siguiendo procedimientos seguros (manejo CO₂ alta presión/baja T en despresurización). Requiere soldadores/montadores calificados.

- **B.4. Soporte Técnico y HSE:**

- **Ingeniero/a de Integridad de Ductos (CO₂):** Responsable **PIM**; análisis detallado resultados ILI/NDT; **evaluación FFS considerando mecanismos de daño por CO₂ (corrosión interna por CO₂ húmedo, fractura)**; planificación reparaciones; actualización planes Mantenimiento/Inspección. Ingeniería (Mecánica/Materiales) exp. (>5 años) integridad ductos (API 1160, ASME B31.4/B31.8S) y **conocimiento de corrosión CO₂.**
- **Ingeniero/a de Operaciones / Despacho (CO₂):** Optimiza transporte CO₂ (mantener fase densa/supercrítica), gestiona balances, coordina usuarios, simulación flujo. Ing. Química/Mecánica exp. operación/simulación de ductos líquidos/gas denso.
- **Coordinador/a HSE (Ductos CO₂):** Foco riesgos operativos (**fugas CO₂ - asfixia, baja T**, seguridad pública traza), planes emergencia específicos CO₂, cumplimiento normativo.

Reflexión sobre Potencial Local (Ductos CO₂):

Similar a los hidroductos, la **experiencia uruguaya en gasoductos/oleoductos es transferible** para muchos roles. Los **aspectos específicos del CO₂ a alta presión** (manejo de fase densa/supercrítica, corrosión por CO₂ húmedo, riesgos de asfixia/baja T) requerirán **formación adicional** y procedimientos adaptados. La normativa específica para ductos de CO₂ puede necesitar desarrollo/adopción en Uruguay (ej. basada en ISO 27913 o regulaciones de EE.UU./Europa). La capacidad local en **Integridad de Ductos (ILI/NDT/FFS)** será clave y puede requerir desarrollo o certificación internacional si la experiencia actual se limita a gas natural/líquidos convencionales. El informe *GIZ/DP* podría dar pistas sobre capacidades existentes en el sector de transporte de fluidos por ducto

Perfiles Ocupacionales Para Construcción Y Operación De Líneas AT y Subestaciones

La evacuación de la energía generada por los aprox. 18.8 GW de EERR y la alimentación de los 9 GW de electrólisis, distribuidos geográficamente, requerirá una **infraestructura robusta de transmisión en Alta Tensión (AT)**, incluyendo **nuevas líneas (probablemente 500 kV y 150 kV) y subestaciones (colectoras de parques y de interconexión a la red nacional de UTE)**. La construcción y operación de esta infraestructura eléctrica de gran escala demanda personal altamente especializado y con experiencia en trabajos con alta tensión, siguiendo estrictas normas técnicas y de seguridad. La planificación y ejecución de estas obras debe coordinarse estrechamente con UTE.

A. Perfiles para Construcción, Montaje y Puesta en Marcha de Líneas AT y Subestaciones

Esta fase implica ingeniería detallada, gestión de permisos/servidumbres (para líneas), obra civil pesada (fundaciones torres/equipos), montaje electromecánico especializado, tendido de conductores y pruebas de alta tensión.

- **A.1. Ingeniería de Diseño y Detalle (EPC o Consultora Especializada en Transmisión):**
 - **Equipo de Ingeniería Multidisciplinar (Exp. en Líneas AT y Subestaciones):**
 - **Ingeniero/a Eléctrico (Sistemas de Potencia - AT):**
 - *Rol:* Diseña la línea de transmisión y la subestación principal.
 - *Responsabilidades Clave:* Estudios eléctricos (flujo de potencia, cortocircuito, estabilidad, coordinación de aislamiento, transitorios electromagnéticos - EMT); **diseño eléctrico de líneas AT** (selección conductor, configuración torre, aisladores, herrajes, PAT); **diseño eléctrico de subestaciones AT** (esquema unifilar, layout de patio, especificación equipos primarios - interruptores, seccionadores, transformadores de potencia/medida, reactores, pararrayos); diseño sistemas auxiliares AC/DC.
 - *Capacidades/Formación:* Ing. Eléctrica (opción Potencia). Experiencia (>5-7 años) diseño líneas/subestaciones AT. Dominio software simulación (PSS/E, DigSilent, ATP/EMTP). Conocimiento normas IEC/IEEE/UTE para AT.
 - **Ingeniero/a Civil / Estructural (Líneas y SE):** Diseño **estructural de torres de AT** (metálicas reticuladas, hormigón); diseño **fundaciones** para torres (adaptadas a geotecnia) y equipos pesados de subestación (transformadores, reactores); diseño de edificios de control/celdas GIS (si aplica). Ing. Civil (opción Estructural). Exp. diseño estructuras AT. Software análisis estructural.
 - **Ingeniero/a de Protecciones, Control y Comunicaciones (P&C - AT):**
 - *Rol:* Diseña los sistemas secundarios de la subestación.
 - *Responsabilidades Clave:* Diseño filosofía de protección; estudios de ajuste de protecciones (distancia, diferencial, sobrecorriente); diseño esquemas lógicos de control/enclavamientos; especificación relés de protección digitales (IEDs), RTUs, sistemas SCADA de subestación; diseño red de comunicaciones (IEC 61850 si aplica); diseño sistemas de medida y calidad de energía.
 - *Capacidades/Formación:* Ing. Eléctrica/Electrónica (opción Control/Potencia). Experiencia (>5 años) diseño P&C para subestaciones AT. Conocimiento profundo de relés (SEL, Siemens, GE, etc.), protocolos (IEC 61850) y software específico.
 - **Especialista en Trazado y Servidumbres (Líneas AT):** Selección ruta línea AT minimizando impacto ambiental/social; gestión permisos; **negociación servidumbres** para la línea (diferente a ductos).

- **A.2. Construcción y Montaje en Sitio:**
 - **Gestión y Supervisión (Empresa Constructora Líneas/SE):** Gerente Proyecto / Jefe Obra: **Experiencia mandatoria (>10 años) construcción líneas/subestaciones AT.** Liderazgo seguridad eléctrica AT. Supervisores/as (Civil, Montaje Torres, Tendido Conductores, Montaje Equipos SE, P&C).
 - **HSE y QA/QC (Foco Eléctrico AT):**
 - **HSE:** Foco riesgos **trabajo en altura** (torres), **riesgo eléctrico MUY ALTO** (proximidad a líneas existentes, energización), maquinaria pesada, izajes. **Cumplimiento estricto Reglamento Seguridad UTE.** Técnico Prevencionista exp. obras eléctricas AT.
 - **QA/QC:** Control calidad fundaciones/estructuras torres; inspección montaje equipos primarios SE; verificación conexiones AT; control torqueo; **pruebas eléctricas** (resistencia aislamiento/contacto, relación transformación, etc.); verificación protocolos P&C. Inspectores certificados (ej. soldadura si aplica, eléctricos).
 - **Oficios Calificados (Construcción Líneas/SE):**
 - **Equipo de Obras Civiles:** Construcción fundaciones torres/equipos SE; montaje edificios control/celdas. (Similares a EERR, pero con especificaciones AT).
 - **Montadores/as de Estructuras Metálicas (Torres AT):** Ensamblaje y montaje de torres de alta tensión reticuladas. **Requiere alta especialización y certificación de trabajo en altura.**
 - **Linieros/as de Alta Tensión (Tendido Conductores):** Instalación de aisladores, poleas, tendido y tensado de conductores y cable de guardia (OPGW si aplica) entre torres. **Trabajo especializado de alto riesgo.** Requiere formación y experiencia específicas.
 - **Montadores/as Electromecánicos (Subestaciones):** Montaje de equipos primarios de patio (interruptores, seccionadores, TPs/TCs, reactores, transformadores), barras colectoras, estructuras soporte. Experiencia montaje SE AT.
 - **Electricistas / Técnicos/as de Protecciones y Control (SE):** Cableado y conexionado de equipos primarios y secundarios (paneles P&C), instalación sistemas auxiliares AC/DC (baterías, cargadores), pruebas funcionales de equipos y circuitos de control/protección. Formación UTU Electricidad/Electrotecnia + **experiencia/formación específica en SE AT.** Habilitación UTE indispensable.
 - **Operadores/as Maquinaria Pesada:** Grúas para montaje torres/equipos, equipos para tendido conductores.
- **A.3. Pruebas Finales y Puesta en Marcha (Comisionado AT):**
 - **Equipo Multidisciplinar de Comisionado (Ing. y Técnicos Exp. en AT):**
 - **Rol:** Realiza las pruebas finales y la energización segura de líneas y subestaciones.
 - **Responsabilidades Clave:** Pruebas dieléctricas de equipos (transformadores, interruptores); pruebas de resistencia de aislamiento y contacto; pruebas funcionales de interruptores/seccionadores; **pruebas completas de sistemas de protección** (inyección primaria/secundaria); pruebas de sistemas de control y SCADA; verificación de enclavamientos; secuencia segura de energización coordinada con UTE; pruebas de carga inicial.
 - **Capacidades:** Ingeniería/Tecnicatura Eléctrica con **experiencia específica (>5-7 años) en comisionado de líneas y subestaciones de AT (150/500 kV).** Manejo experto de equipos de

prueba AT (Megóhmetros, Ducter, equipos prueba relés - Omicron/Doble). Conocimiento profundo de sistemas P&C y seguridad AT.

B. Perfiles para Operación y Mantenimiento (O&M) de Líneas AT y Subestaciones

Asegurar la fiabilidad y disponibilidad de la infraestructura de transmisión asociada al H2V.
(Nota: Parte de esta O&M podría ser realizada por UTE si la infraestructura pasa a su propiedad/operación, pero podría haber componentes privados).

- **B.1. Gestión y Supervisión O&M:**

- **Jefe/a de Mantenimiento AT/SE:** Responsable de la gestión del mantenimiento preventivo/predictivo/correctivo de líneas y subestaciones asociadas. Ingeniería Eléctrica exp. O&M AT (>10 años).
- **Supervisor/a de Mantenimiento (Líneas / Subestaciones):** Supervisa equipos de técnicos en campo. Formación técnica superior/Ing. Eléctrica exp. O&M AT.

- **B.2. Operaciones y Monitoreo (Integrado con Control EERR/H2 o UTE):**

- **Operador/a de Centro de Control:** Monitoriza estado de líneas/SE a través de SCADA, coordina maniobras con UTE y plantas.

- **B.3. Mantenimiento:**

- **Técnico/a de Mantenimiento de Líneas AT:**

- **Rol:** Inspección y mantenimiento de las líneas de transmisión.
- **Responsabilidades Clave:** Inspección periódica (terrestre/aérea/drones) de torres, conductores, aisladores, herrajes, derecho de vía (vegetación); termografía de conexiones; mantenimiento básico de torres; reparaciones menores. **Trabajo en altura.**
- **Capacidades:** Formación técnica (Electricidad/Mantenimiento). **Experiencia específica y certificación para trabajo en líneas AT energizadas o desenergizadas.** GWO/Altura. Carné de conducir.

- **Técnico/a de Mantenimiento de Subestaciones AT (Electromecánico):**

- **Rol:** Mantenimiento de equipos primarios y auxiliares de la SE.
- **Responsabilidades Clave:** Mantenimiento preventivo/correctivo de interruptores (SF6/vacío), seccionadores, transformadores (aceite, refrigeración), reactores, bancos de capacitores; termografía; análisis de aceite aislante (DGA).
- **Capacidades:** Formación UTU (Electrotecnia/Mantenimiento). Experiencia (>5 años) Mantenimiento SE AT. Conocimiento equipos potencia AT. Seguridad eléctrica AT.

- **Técnico/a de Protecciones y Control (P&C - SE):**

- **Rol:** Mantenimiento especializado de sistemas secundarios.
- **Responsabilidades Clave:** Pruebas funcionales periódicas de relés de protección digital (IEDs) y esquemas asociados; mantenimiento sistemas SCADA/comunicaciones (IEC 61850); mantenimiento sistemas auxiliares DC (baterías, cargadores); troubleshooting de fallos en control/protección.

- **Capacidades:** Formación UTU (Electrónica/Control) o Ing. Eléctrica. Experiencia (>5 años) en mantenimiento P&C de SE AT. Manejo de software de configuración/prueba de relés. Conocimiento de protocolos de comunicación.

- **B.4. Soporte Técnico y HSE:**

- **Ingeniero/a de Mantenimiento / Fiabilidad AT:** Analiza rendimiento equipos AT, planifica mantenimientos mayores, análisis de fallos, gestión de repuestos críticos, estudios de vida útil. Ing. Eléctrica exp. O&M AT.
- **Coordinador/a HSE (O&M AT):** Foco en **riesgo eléctrico de Alta Tensión**, procedimientos de trabajo seguros (5 reglas de oro, LOTO), gestión de permisos de trabajo en AT, planes de emergencia específicos. Técnico Prevencionista con exp. sector eléctrico AT.

Reflexión sobre Potencial Local (Líneas AT y SE):

- **Uruguay, a través de UTE y empresas contratistas, posee una base sólida de experiencia y personal calificado** en construcción y O&M de líneas y subestaciones de AT, incluyendo 500 kV.
- La **formación técnica de UTU (Electrotecnia)** y la **Ingeniería Eléctrica de UDELAR** son las fuentes principales de estos perfiles.
- El desafío principal podría ser la **escala y la velocidad** del despliegue requerido, que demandaría un **aumento significativo en la cantidad** de personal calificado y experimentado disponible (linieros AT, montadores SE, técnicos P&C, ingenieros de diseño/O&M AT), como se señala en estudios de transición (*CEC Skilling*, *GIZ/DP* puede tener análisis específico para Uruguay). La **formación continua** en nuevas tecnologías (subestaciones digitales, IEC 61850) también será importante.

5. Estructura ocupacional, habilidades clave y vinculación con la formación profesional.

Este capítulo consolida la información sobre la demanda laboral asociada a la cadena de valor del hidrógeno verde (H₂V) y sus derivados en Uruguay. Se analiza la estructura ocupacional, se identifican las habilidades clave –técnicas y transversales– y se vinculan estos requerimientos con la oferta formativa nacional, siguiendo la ambición definida en la "Hoja de Ruta del Hidrógeno Verde y derivados en Uruguay" (MIEM, 2023) y las necesidades de capacidades identificadas en estudios específicos como el Informe sobre "Fomento de Capacidades".

El desarrollo de esta industria representa una oportunidad significativa, proyectando un volumen total de trabajo directo en toda la fase de construcción del orden de **48.390 Personas-Año** y una plantilla estable en operación y mantenimiento (O&M) estimada en **4.010 FTE** hacia 2040. Estas cifras subrayan la magnitud del desafío y la oportunidad en términos de capital humano. La formación, reconversión y atracción de personal calificado es un habilitador esencial para materializar la Hoja de Ruta del H₂V.

Perfiles Ocupacionales en Fase de Construcción

La fase de construcción (CAPEX) generará la mayor demanda de empleo (un total estimado de **48.390 Personas-Año** directas), aunque de carácter temporal, concentrada en la década de 2030. Requiere un amplio espectro de cualificaciones y un compromiso transversal con la seguridad (HSE).

Construcción de Infraestructura de Generación EERR (18.8 GW)

Alcance y Magnitud: Instalación de **18.8 GW** de potencia renovable (10.2 GW eólicos, 8.7 GW solares) para 2040. Incluye obra civil, montaje de aerogeneradores (>5MW) y paneles/estructuras solares, instalación eléctrica (BT/MT/AT, subestaciones) y logística.

Volumen de Empleo Directo Estimado: El esfuerzo laboral directo total estimado para esta fase es de **13.000 Personas-Año**.

Perfiles Clave Requeridos:

- *Gestión y Supervisión:* Gerentes/as de Proyecto/Construcción EERR, Superintendentes/as, Jefes/as de Frente/Disciplina, Supervisores/as, Capataces/as.
- *Ingeniería y Soporte Técnico:* Ingenieros/as residentes (Civiles, Eléctricos/as, Mecánicos/as), Topógrafos/as, Planificadores/as, Especialistas en Logística Heavy Lift.
- *HSE y QA/QC:* Gerentes/as y Técnicos/as Prevencionistas (HSE), Responsables/Inspectores/as de Calidad (QA/QC).
- *Oficios Calificados (Civil):* Oficiales (Encofradores/as, Ferrallistas/Armadores/as, Albañiles), Hormigoneros/as, Operadores/as de Maquinaria Vial/Pesada.
- *Oficios Calificados (Montaje Eólico):* Montadores/as Mecánicos/as y Estructurales, Técnicos/as de Montaje Eólico (**GWO indispensable**), Riggers/Eslingadores/as, Operadores/as de Grúas (**Alto Tonelaje >500t crítico**).
- *Oficios Calificados (Montaje Solar):* Montadores/as de Estructuras, Instaladores/as de Módulos FV.
- *Oficios Calificados (Eléctrico):* Electricistas Industriales/Montadores (**habilitación UTE indispensable**, exp. MT/AT), Empalmadores/as Fibra Óptica.
- *Otros Oficios:* Soldadores/as (estructural), Andamistas (certif.), Pintores/as.
- *Soporte:* Logística/Almacén, Administrativos/as, Control Documental (EDMS).

Distribución Indicativa de la Demanda (13,000 Personas-Año):

Grupo de Perfil Ocupacional	% Relativo Estimado	Personas-Año Estimadas
Oficios Calificados	70% - 75%	9,100 - 9,750
Gestión y Supervisión de Construcción	5% - 10%	650 - 1,300
HSE y QA/QC	4% - 7%	520 - 910
Obreros Generales y Ayudantes	5% - 8%	650 - 1,040
Ingeniería de Campo y Soporte Técnico	3% - 5%	390 - 650
Logística y Administración de Sitio	3% - 6%	390 - 780
Personal de Comisionado (Fase Final)	2% - 4%	260 - 520
TOTAL	100%	13,000

Oferta Formativa y Brechas: Uruguay cuenta con experiencia previa y oferta formativa (UTU, UTEC, UdelaR, INEFOP, centros GWO). Sin embargo, la escala (18.8 GW) genera **brechas críticas proyectadas**:

- **Técnicos/as de Montaje Eólico (Certificación GWO):** Volumen y especialización en máquinas grandes.
- **Operadores/as de Grúas de Alto Tonelaje (>500t):** Disponibilidad local muy limitada.
- **Electricistas con Experiencia MT/AT y Comisionado:** Volumen y experiencia práctica en grandes parques.
- Potencialmente supervisores e instaladores FV (productividad/calidad).
- **Acciones:** Escalar formación (UTU/UTEC), actualizar currículos, asegurar certificaciones GWO (INEFOP/Privados), fortalecer programas de aprendizaje.

Construcción de Plantas de Electrólisis (9 GW) y Derivados (Metanol, Urea, SAF, Captura CO₂)

Alcance y Magnitud: Construcción de plantas de proceso químico complejo: Electrólisis (9 GW), e-Metanol (3.8 Mtpa), Urea (1.2 Mtpa vía NH₃), e-SAF (0.5 Mtpa vía MtJ) y Captura de CO₂ (~7.2 Mtpa bruto). Implica obra civil industrial, montaje mecánico de precisión, piping H₂/NH₃/MeOH/CO₂, soldadura ASME, sistemas E&I complejos (ATEX, SIS), comisionamiento riguroso.

Volumen de Empleo Directo Estimado: El esfuerzo laboral directo total estimado, según Tabla VI.1, suma **28.462 Personas-Año**.

Perfiles Clave Requeridos:

- *Gestión y Supervisión:* Gerentes/as Proyecto/Construcción (exp. química/proceso/H₂), Jefes/as Disciplina, Supervisores/as, Capataces/as.
- *Ingeniería y Soporte Técnico:* Ingenieros/as residentes (Químicos/as, Procesos, Mecánicos/as, Eléctricos/as, I&C, Civiles, Materiales, Seguridad de Procesos - PSM), Ing. Comisionamiento.
- *HSE y QA/QC:* Gerentes/as HSE (foco químico/PSM), Téc. Prevencionistas, Inspectores/as QA/QC (NDT ASME, ATEX). **Fundamental dada peligrosidad.**
- *Oficios Calificados (Mecánica/Piping):* Montadores/as Mecánicos/as (equipos HP), Cañistas/Tuberos/as Industriales (materiales H₂/alta P), Soldadores/as (**calificación 6G+ ASME IX H₂/NH₃/alta P crítica**). Equipo manejo/carga catalizadores.
- *Oficios Calificados (Eléctrico/I&C):* Electricistas Industriales (**ATEX**), Instrumentistas (**calibración, SIS, ATEX**).
- *Oficios Calificados (Civil/Auxiliar):* Oficiales Civiles, Montadores/as Aislación, Andamistas (certif.), Pintores/as Ind.
- *Soporte:* Personal Laboratorio (pruebas), Logística, Planificadores/as, Control Documental.

Distribución Indicativa de la Demanda (28,500 Personas-Año):

Grupo de Perfil Ocupacional	% Relativo Estimado	Personas-Año Estimadas
Oficios Calificados	65% - 75%	18,500 - 21,347
Gestión y Supervisión de Construcción	5% - 10%	1,423 - 2,846
HSE y QA/QC	4% - 8%	1,138 - 2,277

Obreros Generales y Ayudantes	5% - 10%	1,423 - 2,846
Ingeniería de Campo y Soporte Técnico	3% - 6%	854 - 1,708
Logística y Administración de Sitio	3% - 6%	854 - 1,708
Personal de Comisionado (Fase Final)	2% - 5%	569 - 1,423
TOTAL	100%	28,462

Oferta Formativa y Brechas: Exige un salto cualitativo. La base formativa (UTU, UTEC, Udelar) es pertinente, pero existen **brechas críticas proyectadas**:

- **Soldadores/as y Cañistas/Tuberos/as Alta Calificación (ASME IX):** Escasez severa con certificación y experiencia en materiales/procedimientos H₂, NH₃, alta presión.
- **Técnicos/as I&C Avanzados:** Falta de volumen con competencias en DCS/SIS modernos, calibración y ATEX.
- **Experiencia Específica H₂/Química:** En supervisión, comisionamiento y oficios (manejo seguro). Necesidad de **reconversión**.
- **Seguridad de Procesos (PSM) / ATEX:** Necesidad transversal de **capacitación robusta y certificada**.
- **Comisionamiento:** Escasez de personal con experiencia en arranque seguro de estas plantas.
- **Acciones:** Inversión urgente en formación/certificación (soldadura alta calificación, I&C), programas upskilling/reskilling (INEFOP), formación obligatoria en seguridad H₂V/química.

Construcción de Infraestructura Logística y de Soporte (Ductos H₂, CO₂, Red Eléctrica AT)

Alcance y Magnitud: Construcción de infraestructura lineal: ductos H₂ (ej. 360 km), ductos CO₂ (ej. 500 km), líneas AT (ej. 500 km) y subestaciones AT (ej. 10). Incluye gestión territorial, obra civil lineal, soldadura API/ASME, montaje electromecánico AT. *(Nota: Longitudes/cantidades referenciales S1).*

Volumen de Empleo Directo Estimado: La suma de los componentes arroja un total de **6.940 Personas-Año**.

Perfiles Clave Requeridos:

- *Gestión y Supervisión:* Gerentes/as Construcción (ductos/líneas AT), Jefes/as Tramo/Línea, Supervisores/as.
- *Ingeniería y Soporte Técnico:* Ingenieros/as residentes (Civiles, Mecánicos/as, Eléctricos/as AT), Topógrafos/as, Especialistas Permitting/Servidumbres.
- *HSE y QA/QC:* Téc. Prevencionistas, Inspectores/as QA/QC (Soldadura NDT API/ASME, Recubrimientos, Eléctrico AT).
- *Oficios Calificados:* Soldadores/as (ductos API 1104 / ASME IX H₂/CO₂), Operadores/as Maquinaria Pesada (tiendetubos), Montadores/as (estructuras AT), Linieros/as AT, Aplicadores/as Revestimiento, Electricistas AT, Técnicos/as NDT.
- *Soporte:* Logística, Administración.

Distribución Indicativa de la Demanda (6.940 Personas-Año):

Grupo de Perfil Ocupacional	% Relativo Estimado	Personas-Año Estimadas
-----------------------------	---------------------	------------------------

Oficios Calificados	65% - 75%	4,511 - 5,205
Gestión y Supervisión de Construcción	8% - 12%	555 - 833
HSE y QA/QC	5% - 8%	347 - 555
Logística, Admin. y Gestión Territorial	5% - 10%	347 - 694
Ingeniería de Campo y Soporte Técnico	4% - 7%	278 - 486
Obreros Generales y Ayudantes	5% - 10%	347 - 694
Personal de Comisionado (Fase Final Const.)	2% - 4%	139 - 278
TOTAL	100%	6,940

Oferta Formativa y Brechas: La experiencia uruguaya en gasoductos y líneas AT es transferible. Las brechas se concentran en especialización H₂/CO₂ y escala:

- **Soldadores/as Calificados (API/ASME H₂/CO₂):** Volumen insuficiente con calificación específica para H₂/CO₂.
- **Técnicos/as NDT Avanzados:** Para asegurar integridad.
- **Linieros/as AT:** Potencial cuello de botella por volumen.
- **Comisionado Ductos H₂/CO₂:** Experiencia específica limitada.
- **Gestión Territorial:** Capacidad para gestionar permisos/servidumbres a gran escala.
- **Acciones:** Reforzar certificación API/ASME H₂/CO₂ (INEFOP), formar NDT/Linieros AT, desarrollar protocolos/formación comisionado y seguridad H₂/CO₂ para ductos.

Perfiles Ocupacionales en Fase de Operación y Mantenimiento (O&M)

La fase de operación y mantenimiento (O&M), que se extiende durante la vida útil de las instalaciones (típicamente 20-30 años o más), es fundamental para asegurar la producción continua, eficiente y segura de H₂V y sus derivados, garantizando la rentabilidad de las inversiones y generando **empleo estable y de alta calificación**, como resalta la Hoja de Ruta. Esta fase requiere perfiles con un alto grado de especialización técnica, un compromiso riguroso con la seguridad y una creciente integración de herramientas digitales. La formación continua, la cultura de seguridad y la gestión por procedimientos operativos estandarizados (SOPs) son indispensables.

La demanda total de empleo directo estable para la fase de O&M en 2040 se estima en **4.010 FTE** (Full Time Equivalent).

O&M de Generación EERR (18.8 GW)

Alcance y Magnitud: O&M continuo de 18.8 GW EERR (10.2 GW eólicos, 8.7 GW solares), incluyendo gestión de activos, monitoreo remoto, mantenimiento preventivo/predictivo/correctivo.

Volumen de Empleo Directo Estimado: La plantilla estable requerida se estima en **1.325 FTE** (1.020 Eólica + 305 Solar).

Perfiles Clave Requeridos:

- *Gestión y Supervisión:* Gerentes/as de Activos EERR, Jefes/as de Parque, Supervisores/as y Planificadores/as de Mantenimiento (CMMS/GMAO).

- *Operaciones y Análisis:* Operadores/as de Centro de Control Remoto (SCADA 24/7), Ingenieros/as de Rendimiento / Analistas de Datos (KPIs, PR, diagnóstico predictivo).
- *Mantenimiento Eólico:* Técnicos/as de Mantenimiento Eólico (Niveles I-III, multi-skilled, **GWO indispensable**), Técnicos/as Especialistas en Palas.
- *Mantenimiento Solar:* Técnicos/as de Mantenimiento Solar / Electricistas FV (módulos, inversores, trackers, limpieza, IR/curvas I-V), Equipo Control Vegetación.
- *Mantenimiento Eléctrico AT/MT:* Técnicos/as de Alta Tensión (O&M subestaciones).
- *Soporte Técnico y HSE:* Ingenieros/as de Fiabilidad, Especialistas SCADA/Ciberseguridad OT, Coordinadores/as HSE (O&M EERR), Personal de Almacén.

Distribución Indicativa de la Demanda (1.325 FTE):

Grupo de Perfil Ocupacional	% Relativo Estimado	FTE Estimados (2040)
Técnicos/as de O&M (Eólico/Solar - Campo)	45% - 55%	596 - 729
Operadores/as Centro Control / Monitoreo	10% - 15%	133 - 199
Gestión de Sitio y Supervisión O&M	8% - 12%	106 - 159
Ingeniería y Soporte Técnico	8% - 12%	106 - 159
Gestión de Activos (Asset Management)	3% - 5%	40 - 66
HSE (O&M)	3% - 5%	40 - 66
Administración y Logística (O&M)	4% - 6%	53 - 80
TOTAL	100%	1,325

Oferta Formativa y Brechas: La experiencia previa es relevante, pero el desafío es escalar para cubrir más de 1,300 FTE.

- **Brecha Crítica - Técnicos/as Eólicos (GWO):** Alto volumen necesario con certificación y experiencia en máquinas grandes.
- **Brecha Crítica - Técnicos/as Solares FV:** Volumen similar con capacidad de diagnóstico avanzado.
- **Brecha Significativa - Roles Digitales/Analíticos:** Necesidad de formar personal en SCADA, ciberseguridad OT, análisis de datos, PdM.
- **Acciones:** Ampliar capacidad UTU/UTEC, asegurar escala certificación GWO (INEFOP/Privados), actualizar currículos (digitalización), fomentar formación continua.

O&M de Plantas de Electrólisis y Derivados (Metanol, Urea, SAF, Captura CO2)

Alcance y Magnitud: O&M 24/7 de Electrólisis (9 GW), e-Metanol (3.8 Mtpa), Urea (1.2 Mtpa), e-SAF (0.5 Mtpa) y Captura CO₂ (~7.2 Mtpa bruto). Requiere operación integrada, manejo de fluidos peligrosos y altos estándares PSM.

Volumen de Empleo Directo Estimado: La plantilla estable total, según Tabla VI.2, se estima en **2.546 FTE** (1,167 Ely + 874 MeOH + 185 Urea + 103 SAF + 216 Captura CO2).

Perfiles Clave Requeridos (Detalle basado en Cap. VII y "Fomento de Capacidades"):

- **Gestión y Supervisión:** Jefes/as de Planta (exp. química), Jefes/as de Turno/Producción, Supervisores/as de Mantenimiento (exp. planta química). Liderazgo en PSM.
- **Operaciones:** Operadores/as Sala Control (CCR - DCS), Operadores/as Campo (rondas H₂/NH₃/MeOH). **Formación seguridad H₂/NH₃/MeOH obligatoria.**
- **Mantenimiento:** Técnicos/as Mantenimiento multi-skilled (Mecánico: compresores HP H₂, bombas; Eléctrico: ATEX; I&C: calibración analizadores, SIS, ATEX). Técnicos especialistas Electrolizadores y Tratamiento Agua. Técnicos Mant. Predictivo.
- **Soporte Técnico, Calidad y HSE:** Ingenieros/as Procesos (optimización), Personal Laboratorio (calidad H₂/derivados), Ing./Téc. Seguridad Procesos (PSM), Coordinadores/as HSE (químico/H₂).
- **Logística:** Operadores/as carga/descarga, gestores/as almacén.

Distribución Indicativa de la Demanda (2.546 FTE):

Grupo de Perfil Ocupacional	% Relativo Estimado	FTE Estimados (2040)
Operadores/as (Sala Control y Campo)	35% - 45%	891 - 1,146
Técnicos/as de Mantenimiento (Multi-disc.)	30% - 40%	764 - 1,018
Profesionales (Ing., Supervisión, Jefatura)	10% - 15%	255 - 382
Soporte Técnico y Logística (Lab, HSE, Alm)	5% - 10%	127 - 255
TOTAL	~100%	2,546

Oferta Formativa y Brechas: La base industrial (ANCAP, química, celulosa) es importante. Las brechas principales, confirmadas en "Fomento de Capacidades", son:

- **Brecha Crítica - Técnicos/as O&M Electrolizadores:** Falta experiencia en sistemas GW-scale.
- **Brecha Crítica - Operadores/as DCS y Téc. I&C (H₂/PtX):** Competencias avanzadas en control de procesos complejos/peligrosos y mantenimiento instrumentación especializada (SIS, ATEX, analizadores H₂).
- **Brecha Significativa - Ing. Procesos y Seguridad (H₂/PtX/PSM):** Demanda de expertos en H₂/derivados y aplicación rigurosa de PSM.
- **Brecha Transversal - Seguridad Específica H₂/NH₃/MeOH:** Necesidad de formación práctica y cultura de seguridad robusta.
- **Acciones:** Actualización curricular profunda (UTU/UTEC), posgrados especializados (UdelaR/UTEC), rol **crucial INEFOP** para certificaciones de seguridad (H₂/NH₃/MeOH, ATEX, PSM) y upskilling/reskilling. Necesidad de simuladores y laboratorios..

O&M de Infraestructura Logística y de Soporte (Ductos H₂, CO₂, Red Eléctrica AT, H₂ Transporte, Puerto)

Alcance y Magnitud: O&M de ductos H₂/CO₂, líneas AT y subestaciones. (Nota: A diferencia de análisis posteriores, la Tabla VI.2 no incluye explícitamente FTEs para Puerto/Logística ni H₂ Transporte, por lo que esos perfiles se omiten aquí para mantener consistencia estricta con la fuente indicada).

Volumen de Empleo Directo Estimado: La plantilla estable para O&M de ductos y red eléctrica, según Tabla VI.2, se estima en **140 FTE** (25 Ducto H₂ + 70 Ducto CO₂ + 25 Línea AT + 20 SE).

Perfiles Clave Requeridos (Ductos y Red Eléctrica - Detalle basado en Cap. VII):

- *Ductos:* Técnicos/as Mantenimiento/Integridad (patrullaje, PIGs/NDT, prot. catódica), Operadores/as SCADA/Estaciones, Ing. Integridad (RBI, FFS).
- *Red Eléctrica:* Técnicos/as/Linieros/as Mantenimiento AT/SE, Operadores/as Centro Control.
- *Soporte:* Supervisión O&M (Ductos/Red), Planificadores/as, HSE (infraestructura lineal), Gestores/as Servidumbres.

Distribución Indicativa de la Demanda (140 FTE):

Grupo de Perfil Ocupacional	% Relativo Estimado	FTE Estimados (2040)
Técnicos/as de Mantenimiento (Campo/Inst)	40% - 55%	56 - 77
Ing./Especialistas Integridad	10% - 20%	14 - 28
Operadores/as (SCADA / Control)	10% - 20%	14 - 28
Supervisión y Planificación O&M	8% - 15%	11 - 21
HSE, Gestión ROW/Permisos	5% - 10%	7 - 14
Administración y Soporte	3% - 8%	4 - 11
TOTAL	100%	140

(Nota: Porcentajes ajustados para reflejar los perfiles relevantes para ductos y red eléctrica únicamente, basado en el total FTE de 140).

Oferta Formativa y Brechas: La experiencia en O&M de gasoductos y red AT es una base sólida. Las brechas se centran en la especialización:

- **Brecha Potencial - Especialistas Integridad Ductos H₂/CO₂:** Experiencia limitada en mecanismos de daño específicos e interpretación ILI/NDT para H₂/CO₂.
- **Brecha Potencial - Técnicos NDT Avanzado (Ductos):** Disponibilidad de personal certificado en técnicas específicas.
- **Acciones:** Desarrollar módulos/certificaciones (INEFOP/UTU) para integridad ductos H₂/CO₂, NDT avanzado. Upskilling desde O&M gas/electricidad.

Requerimientos Transversales y de Gestión

Más allá de los perfiles técnicos directamente involucrados en la construcción, operación y mantenimiento, el éxito del despliegue de la cadena de valor del H₂V, dependerá críticamente de un conjunto de **roles transversales y de gestión**. Estos perfiles son esenciales para la planificación estratégica, la ejecución eficiente de proyectos, la supervisión integral, el cumplimiento normativo (nacional e internacional), la gestión de la cadena de suministro, el relacionamiento con actores clave y el soporte general de los proyectos y las operaciones. La demanda de estos roles se distribuirá a lo largo de ambas fases (construcción y O&M), aunque con énfasis distintos. La "Hoja de Ruta" y el

informe de "Fomento de Capacidades" subrayan la importancia de una gobernanza clara, políticas de estado, atracción de inversiones y diálogo ciudadano, funciones que recaen en gran medida sobre estos perfiles.

Perfiles Clave Requeridos:

- a. **Gestión de Proyectos (Project Management):** Gerentes/as de Proyecto (experiencia en megaproyectos energéticos/industriales), Ingenieros/as de Proyecto, Planificadores/as (Primavera P6/MS Project), Control de Costos, Administradores/as de Contratos (EPC, PPA, suministro). Requieren liderazgo, gestión de riesgos complejos (técnicos, financieros, H₂V), planificación estratégica, negociación.
- b. **Seguridad, Salud Ocupacional y Medio Ambiente (HSE):** Gerentes/as HSE, Ingenieros/as de Seguridad de Procesos (PSM - HAZOP, LOPA, SIL), Técnicos/as Prevencionistas (especialización industrial/química/H₂), Especialistas Ambientales (EIA, permisos, monitoreo), Higienistas Industriales. Necesitan conocimiento profundo de normativa HSE (nacional/internacional H₂/NH₃/MeOH/ATEX), análisis de riesgos, auditorías, sistemas de gestión ISO 14001/45001, y fomento de cultura de seguridad.
- c. **Cadena de Suministro y Logística (Supply Chain):** Gerentes/as de Compras/Contrataciones, Compradores/as Técnicos/as (equipos H₂/PtX), Especialistas en Logística (internacional, multimodal - ferroviario/marítimo H₂/derivados), Administradores/as de Almacenes (repuestos críticos, materiales peligrosos), Despachantes de Aduana. Requieren negociación con proveedores globales, gestión de contratos, conocimiento logística H₂/derivados/equipos grandes, manejo ERP/SCM.
- d. **Regulación, Permisos y Relaciones Comunitarias (RRCC):** Especialistas en Regulación Energética/Ambiental/H₂V, Abogados/as (energía, proyectos, societario), Gestores/as de Permisos (ambientales, construcción, operación, servidumbres), Especialistas en Relacionamiento Comunitario / Licencia Social. Necesitan conocimiento del marco normativo (nacional, UE RED II/III), metodologías de participación ciudadana, negociación con organismos/comunidades, gestión de conflictos.
- e. **Recursos Humanos (RRHH):** Gerentes/as y Generalistas RRHH, Especialistas en Selección (perfiles técnicos H₂V escasos), Especialistas en Capacitación y Desarrollo (diseño curricular H₂V, articulación INEFOP/UTU/UTEC), Especialistas en Relaciones Laborales. Requieren diseño de perfiles, atracción/retención de talento técnico, diseño e implementación de planes de formación/reskilling, gestión del desempeño, legislación laboral.
- f. **Administración, Finanzas y TI:** Gerentes/as Admin./Financieros, Contadores/as (proyectos), Analistas Financieros (Project Finance H₂V), Personal Administrativo, Especialistas en TI (infraestructura, **Ciberseguridad Industrial - OT Security**), Especialistas en Certificación H₂ Verde. Necesitan contabilidad de proyectos, modelado financiero/mercados H₂, gestión riesgo, ERPs, conocimiento esquemas certificación H₂ (CertifHy, ISCC), ciberseguridad ICS (IEC 62443).
- g. **I+D+i, Formación y Consultoría:** Investigadores/as (electroquímica, materiales H₂, procesos), Formadores/as Técnicos Especializados (H₂V/Seguridad/Oficios), Consultores/as (Técnicos, Económicos, Ambientales H₂V).

Estimación Indicativa de la Demanda: Cuantificar la demanda exacta para estos roles es complejo, ya que dependen de la estructura organizacional, número de empresas, nivel de inversión en I+D+i, etc. Sin embargo, para proporcionar un orden de magnitud, se puede estimar que estas funciones podrían representar entre un **15% y un 30%** del total de la fuerza laboral directa estable de O&M (4.010 FTE). Esto situaría la demanda para estos roles transversales y de gestión en un rango ilustrativo de **600 a 1.200 FTE** estables hacia 2040, además del personal requerido durante la fase de construcción.

Distribución Relativa Estimada: La siguiente tabla muestra una distribución porcentual relativa estimada basada en la estructura presentada originalmente en el informe:

Tabla VIII-7 Distribución Relativa Indicativa de Perfiles Transversales y de Gestión

Perfil / Grupo de Perfil Ocupacional Transversal	% Relativo Estimado/Indicativo
Soporte Administrativo Transversal	14%
Gestión de Proyectos / Desarrollo Negocios	10%
Consultoría (Técnica/Económica/Ambiental)	8%
Cadena de Suministro / Logística (Transversal)	7%
TI/OT y Digitalización	7%
Formación Técnica Especializada	7%
Gestión de Seguridad Transversal	7%
Regulación y Permitting	6%
Financiero / Inversiones	6%
Recursos Humanos	6%
Sostenibilidad / ESG	6%
Asuntos Públicos / Comunitarios	5%
Auditoría / Certificación	5%
Legal (Energía / Proyectos)	3%
I+D+i (Investigador/Científico)	3%
TOTAL, RELATIVO	100%

Oferta Formativa y Brechas: Estos roles requieren mayoritariamente formación universitaria (grado y posgrado) y alta especialización.

- h. **Fortalezas:** Uruguay cuenta con buena formación universitaria en Ingeniería, Economía, Administración, Derecho, Ciencias Sociales, Informática.
- i. **Brechas:** La principal brecha es la **especialización y experiencia en H₂V**. Se necesita desarrollar conocimientos específicos en:
 - i. Regulación H₂V (nacional e internacional).
 - ii. Finanzas de proyectos H₂V.
 - iii. Seguridad de Procesos (PSM) aplicada a H₂/NH₃/MeOH.
 - iv. Certificación de H₂ verde y derivados.
 - v. Ciberseguridad OT específica para infraestructuras energéticas/químicas.

- vi. Logística de H₂/derivados.
- vii. Diseño curricular y formación de formadores para H₂V.
- j. **Acciones:** Necesidad de crear **posgrados, diplomados y cursos de especialización** en H₂V en universidades (UdelaR, UTEC, Privadas). Fomentar la **investigación aplicada** en H₂V. Programas de **capacitación específicos para reguladores y gestores públicos**. Atraer talento con experiencia internacional y fomentar la **transferencia de conocimiento**. Rol de INEFOP y ANII en financiar formación especializada y proyectos de I+D+i.

6. Recomendaciones de políticas activas de empleo y formación profesional

El desarrollo de la industria del hidrógeno verde (H₂V) representa una oportunidad estratégica para Uruguay en el marco de la transición hacia una economía baja en carbono. La Hoja de Ruta del Hidrógeno Verde establece una meta de 1 Mtpa de producción para 2040, lo que implica una transformación productiva profunda con potenciales impactos significativos en el mercado laboral. Esta transición no es un mero cambio de fuente energética, sino que se enmarca en un contexto global de reconfiguración económica, tecnológica y social. Los informes internacionales, como el "Future of Jobs Report 2025" del Foro Económico Mundial, destacan que la transición verde, junto con la digitalización, es uno de los principales motores de la transformación del mercado laboral en la presente década. En este sentido, la estrategia de H₂V de Uruguay debe ser concebida como un capítulo destacado de la nueva política de desarrollo industrial del país, una que busca potenciar la innovación, crear empleos de calidad y mejorar la competitividad nacional, en línea con las prioridades de gobierno establecidas.

Como se presentó en el producto anterior, se estima un volumen total de trabajo cercano a los 48.390 empleos directos totales en los 15 años de la fase de construcción. El empleo promedio anual de esta etapa alcanzaría los 3.200 puestos directos, pero en los momentos de mayor concentración se podría alcanzar a los 6.000 puestos directos. Por otra parte, en la fase operativa se estima una plantilla promedio anual cercana a los 4.000 empleos directos. En este sentido, teniendo en cuenta este aumento potencial en la demanda de empleo resulta fundamental anticipar y cubrir las demandas formativas asociadas a los nuevos perfiles y contenidos requeridos por la cadena de valor del H₂V.

Si bien las recomendaciones se presentan de manera agregada, es crucial tener presente la "opción estratégica" que el país decida tomar. Una estrategia de "polos de desarrollo" concentrará la demanda de empleo y las necesidades formativas en pocas regiones, mientras que una estrategia de "desarrollo territorial equilibrado" exigirá una capilaridad y una distribución de la oferta formativa mucho más amplia. Las políticas aquí recomendadas deberán modularse y priorizarse geográficamente en función de dicha opción estratégica.

En este contexto, se entiende que la articulación interinstitucional y territorial es crucial para alinear las políticas educativas, energéticas y de desarrollo productivo con una visión integrada. En este sentido, se debe considerar la creación de una **Mesa Interinstitucional de Empleo y Formación para el H₂V** con participación del MTSS, MIEM, MVOT, Ministerio de ambiente, ANEP, UDELAR, UTEC, Universidades Privadas, UTU, OPP, INEFOP, Gobiernos Departamentales y actores privados, representados a través de sus gremiales más relevantes como la Asociación Uruguaya de Energías

Renovables (AUDER) y la Asociación Uruguaya de Hidrógeno (AUH2), cuya participación será fundamental para asegurar que la oferta formativa responda a la demanda real de la industria. Esta Mesa deberá tener un mandato claro que incluya la validación de perfiles ocupacionales, el monitoreo continuo de brechas de habilidades y la coordinación de inversiones en equipamiento didáctico para los centros de formación. Sería responsabilidad de esta Mesa, además, el diseño y la supervisión de un Plan de Acción Nacional para el Desarrollo de Capacidades, para el cual se podrían tomar como referencia ejemplos internacionales como el "[BC Hydrogen Workforce Capacity building Strategy and Action-Plan](#)" de Columbia Británica, Canadá.

Por otra parte, se considera que sería de utilidad el desarrollo de mapas territoriales de demanda laboral anticipada que permita planificar la oferta educativa según necesidades regionales. Este concepto debe evolucionar desde una fotografía estática hacia un proceso dinámico. Proponemos la creación de un "**Observatorio de Prospectiva Laboral para la Transición Energética**", posiblemente en la órbita del MTSS con soporte de la Mesa Interinstitucional. Este Observatorio, inspirado en el concepto de "Strategic Foresighting" de Columbia Británica, tendría la misión de actualizar anualmente las proyecciones de demanda, monitorear la emergencia de nuevas tecnologías y emitir alertas tempranas sobre brechas de habilidades, permitiendo una adaptación continua del sistema formativo. A su vez, se debería impulsar la elaboración de planes locales de empleo y capacitación alineados con la localización de los proyectos industriales, lo que garantizará una formación pertinente y contextualizada. En este punto, se recomienda tomar como referencias iniciativas como las del Reino Unido ([Hydrogen Skills Alliance](#)) y de la Unión Europea ([European Hydrogen Academy](#)).

Por su parte, la integración de los Gobiernos Departamentales, los Centros Públicos de Empleo (CEPE) del MTSS y las oficinas del INEFOP como actores clave en la implementación local, y su vínculo con los Comités departamentales de Empleo y Formación Profesional fortalecerán la conexión entre la formación y el mercado laboral.

I. Perfiles Ocupacionales Clave y Brechas Formativas

En lo relativo a perfiles ocupacionales claves se identificaron aquellos que aumentarán su demanda y para los cuales será necesario potenciar la capacitación. En primer lugar, se encuentran los perfiles con mayores demandas absolutas en donde ubicamos a los oficios calificados de la Construcción (civiles, mecánicos, eléctricos, soldadores, montadores, operadores de maquinaria) y a los Técnicos y Operarios de operación y mantenimiento (Técnicos en Energías Renovables Eólica/Solar, Técnicos de Mantenimiento Industrial Mec/Elec/I&C, Operadores de Planta/Sala de Control).

Por otra parte, encontramos a los perfiles críticos por las necesidades específicas de especialización. Se entiende que la viabilidad técnica y la seguridad operativa de los proyectos dependen crucialmente de perfiles altamente especializados. Del relevamiento realizado surge que donde se anticipan las mayores brechas de habilidades es en soldadores calificados (particularmente aquellos con certificación 6G o equivalente bajo códigos ASME/ISO para piping de proceso en servicio H2/alta presión), técnicos de instrumentación y control (con competencias prácticas en DCS/SIS modernos, buses de campo y calibración avanzada en H2/NH3/MeOH), técnicos de operación y mantenimiento de electrolizadores, Ingenieros de procesos y seguridad (con experiencia en H2V/PtX y aplicación rigurosa de PSM), habilidades digitales y de datos, y seguridad específica (manejo seguro de H2, NH3, MeOH y trabajo en áreas ATEX).

Un área que requiere un énfasis particular es la de **Salud, Seguridad Ocupacional y Ambiente (HSE)**. El "Reglamento de seguridad de proyectos de hidrógeno" de URSEA establece un marco exigente que demanda competencias específicas. Por lo tanto, identificamos como perfiles transversales críticos a los siguientes:

- **Ingeniero/a de Seguridad de Procesos (PSM) para H₂V:** Profesional con formación en análisis de riesgos de procesos (HAZOP, LOPA), diseño de sistemas instrumentados de seguridad (SIS) y con profundo conocimiento de la normativa URSEA y estándares internacionales como NFPA 2.
- **Técnico/a Prevencionista con especialización en atmósferas explosivas (ATEX):** Un rol esencial para la operación segura de cualquier instalación que maneje hidrógeno, responsable de la clasificación de áreas, selección de equipos adecuados y procedimientos de trabajo seguro.
- **Especialista en Respuesta a Emergencias con Materiales Peligrosos (Hazmat):** Personal capacitado para liderar la respuesta ante contingencias como fugas de hidrógeno o amoníaco, coordinando con bomberos y otros servicios de emergencia.

Asimismo, un perfil emergente de alta relevancia estratégica, dada la interdependencia de recursos, es el de **"Especialista en Gestión Integrada de Agua y Energía"**. Considerando que la producción de H₂V es intensiva en el uso de agua, y que Uruguay es un país agroindustrial, es fundamental contar con profesionales que puedan modelar y gestionar el nexo agua-energía-alimentos. Por ello, recomendamos que las Universidades desarrollen programas de posgrado y especialización en esta área para asegurar que la expansión del H₂V se realice de manera sostenible y en armonía con la seguridad hídrica.

En otro orden, existen perfiles que se destacan por su potencial en términos de desarrollo local o a nivel socioeconómico. Dentro de los perfiles con potencial para el desarrollo local, se encuentran roles como los oficios de construcción civil, instaladores solares, operarios generales, y potencialmente técnicos eléctricos/mecánicos (mediante upskilling). Estos perfiles ofrecen oportunidades significativas para la incorporación de mano de obra local, siempre que se implementen las estrategias formativas adecuadas. Más allá del empleo directo, el mayor impacto en las economías locales provendrá de los empleos indirectos e inducidos. Por ello, proponemos que se valore la creación de un "Programa de Desarrollo de Proveedores Locales para la Industria del H₂V", gestionado por la Mesa Interinstitucional con las agencias de desarrollo departamentales y la ANDE. Este programa debería mapear las capacidades de las PYMES locales y ofrecerles la capacitación necesaria para cumplir con los estándares técnicos, de seguridad y de calidad que exigirán los grandes proyectos, facilitando su inserción en la cadena de valor para servicios de mantenimiento, logística, catering, seguridad, entre otros.

Por último, en el caso de los perfiles que podrían tener un alto impacto socioeconómico, encontramos a los puestos que generan alto valor agregado y que por lo tanto ofrecen empleos de alta calidad. Dentro de estos encontramos a los puestos vinculados a ingenierías, gestión de proyectos, I+D+i y formación especializada.

El análisis de la vinculación con la oferta formativa uruguaya (UdelaR, UTEC, DGETP-UTU, INEFOP, Privados), detallado en el Capítulo IX del producto anterior, concluye que, si bien existe una base institucional sólida y capacidades transferibles importantes, la oferta actual es insuficiente en escala y especificidad para cubrir la demanda proyectada del H₂V. Las brechas identificadas (en contenidos H₂/PtX, habilidades técnicas avanzadas, competencias digitales, seguridad de procesos, escala de

egresos, certificación y agilidad del sistema) requieren una respuesta estratégica, coordinada y con inversión sostenida. Es imperativo implementar acciones concretas como la actualización curricular profunda, la creación de nuevos programas específicos H₂V, la inversión en equipamiento didáctico y formación docente, el fortalecimiento de INEFOP para upskilling/reskilling y certificación, y el establecimiento de un sistema de gobernanza multi-actor (Comité Sectorial) que asegure la alineación continua entre oferta y demanda.

II. Recomendaciones de Formación y Capacitación

En lo relativo a los contenidos que se necesitan incorporar o potenciar en las curriculas de carreras de nivel medio y terciario, como las ofrecidas por UTU, UTEC, UDELAR Y Universidades Privadas, encontramos a la electrólisis, la captura de CO₂, la síntesis de combustibles y la operación de plantas industriales. Además, se sugiere la creación de programas modulares certificados en ocupaciones críticas, tales como técnicos en electrólisis, operadores de plantas de e-combustibles y especialistas en seguridad industrial. Para aumentar la agilidad y flexibilidad del sistema, recomendamos el desarrollo de un "Sistema Nacional de Microcredenciales para la Transición Energética", liderado por el MEC y en coordinación con INEFOP. Este sistema permitiría la capacitación rápida y el perfeccionamiento (upskilling) de la fuerza laboral existente a través de módulos cortos y enfocados en competencias de alta demanda, como "Seguridad Operativa en Plantas de Hidrógeno", "Mantenimiento de Electrolizadores" o el cumplimiento de normativas ATEX.

La implementación de centros regionales de formación en el noroeste, centro y suroeste del país, en consonancia con la localización de los hubs industriales proyectados, facilitará el acceso a la capacitación especializada. Un modelo a seguir puede ser la creación de una "Alianza para el Talento H₂V - Litoral", que tome el proyecto de HIF Global en Paysandú como un caso piloto. Esta alianza, articulada por la Mesa Interinstitucional, podría involucrar a la propia empresa, UTEC, UTU, INEFOP, y contar con el asesoramiento técnico y la validación de perfiles por parte de **AUDER** y **AUH2**, para co-diseñar los primeros cursos ajustados a las necesidades reales de una planta de e-combustibles, sirviendo de modelo para futuras iniciativas. Asimismo, recomendamos inspirarnos en el modelo de Alemania y los Países Bajos, promoviendo la formación dual (empresa-centro) para favorecer la empleabilidad. En el caso de Alemania, las Universidades técnicas y las Cámaras de comercio están implementando módulos de formación continua en hidrógeno y electrólisis, con certificación dual (empresa-centro de formación). Por su parte, en Países Bajos en el marco del programa Hydrogen Delta en el puerto de Rotterdam, que agrupa a operadores, universidades y centros técnicos, se coordinan iniciativas para formar a más de 15.000 personas hacia 2030. Uruguay por su parte ya ha desarrollado experiencias de formación dual gestionadas a través de INEFOP, por lo que se lo visualiza como actor clave para llevar adelante experiencias específicas en hidrógeno verde cuando alguno de los proyectos se encuentre en la etapa operativa. En esta línea, se podría potenciar la colaboración estratégica entre INEFOP y la Cámara de Comercio e Industria Uruguayo-Alemana (AHK), que ya implementa programas de formación dual, para adaptar el exitoso modelo alemán a los perfiles críticos de H₂V. Esta cooperación podría extenderse a agencias y cámaras de España y Francia, para incorporar experiencia en gestión de infraestructura y logística de gases.

El fortalecimiento de competencias transversales y digitales es esencial para mejorar la

empleabilidad mediante la adquisición de habilidades clave para la industria del H₂V. En este punto, se entiende necesario integrar competencias en TICs, gestión ambiental, control de calidad, seguridad ocupacional y eficiencia energética en todos los niveles formativos. La promoción de certificaciones en normas ISO (calidad, ambiente, energía) aplicables a procesos del H₂V contribuirá a estandarizar y garantizar la calidad en el sector. Ofrecer capacitaciones en sistemas SCADA, automatización industrial y mantenimiento predictivo permitirá a los trabajadores adaptarse a las tecnologías emergentes. Además, es fundamental promover el desarrollo de habilidades blandas, como trabajo en equipo, comunicación efectiva y resolución de problemas, claves para entornos industriales complejos. Siguiendo las tendencias identificadas por el Foro Económico Mundial, es clave que el sistema educativo fomente competencias como el pensamiento analítico y creativo, la resiliencia, la agilidad y la curiosidad, preparando a los trabajadores no solo para los trabajos de hoy, sino para un aprendizaje y adaptación continuos a lo largo de su vida profesional (lifelong learning).

Para asegurar que los futuros talentos conozcan estas oportunidades, proponemos desarrollar un "Programa Nacional de Sensibilización y Orientación Profesional", inspirado en las estrategias de Columbia Británica. Este programa, dirigido a jóvenes, debería incluir la creación de un "Mapa de Carreras del Hidrógeno Verde en Uruguay" interactivo en línea, y la realización de campañas de divulgación y ferias vocacionales en centros de educación media y técnica para promover las carreras STEM y los oficios calificados que la nueva industria demandará.

III. I+D+i, Certificación y Desarrollo de Talento

La promoción de I+D+i y formación avanzada es esencial para fortalecer las capacidades nacionales en investigación aplicada e innovación tecnológica. Financiar becas de posgrado en áreas clave, como energías renovables, procesos químicos, captura de carbono y modelado de sistemas, fomentará la especialización y el desarrollo de soluciones innovadoras. Específicamente, recomendamos fortalecer el "Fondo Sectorial H₂V" cogestionado por ANII y el MIEM para financiar proyectos de investigación aplicada y desarrollo de prototipos que respondan a desafíos locales, en estrecha colaboración con UDELAR y UTEC. Estimular la creación de redes de investigación, spin-offs tecnológicas y alianzas universidad-empresa facilitará la transferencia de conocimiento y tecnología. En esta línea, se destaca como positivo el Convenio entre la empresa Kahiros y la UTEC con el objetivo de desarrollar iniciativas conjuntas de formación e investigación en lo que será la primera planta de hidrógeno verde del país. Adicionalmente, se considera relevante la creación de programas de atracción y retención de talento, lo que permitirá cubrir perfiles de alta especialización necesarios para el sector, contribuyendo a promover una estrategia nacional de talentos en hidrógeno verde. Para fortalecer esta estrategia, se podría dar un rol protagónico a las empresas públicas (UTE, ANCAP, etc.), como tractoras de la formación y la innovación. En coordinación con la Mesa Interinstitucional, estas empresas podrían liderar programas de formación dual, ofrecer pasantías especializadas y definir perfiles prioritarios, asegurando que el desarrollo de capacidades responda a una estrategia de soberanía energética y desarrollo industrial nacional.

Por otra parte, la certificación de competencias y la mejora de condiciones laborales son esenciales para garantizar la calidad del empleo y la seguridad en el sector H₂V. Establecer un sistema de certificación nacional de competencias laborales en el sector H₂V alineado con estándares internacionales, permitirá reconocer y validar las habilidades adquiridas por los trabajadores. Asimismo, recomendamos establecer un marco de "Empleos de Calidad H₂V", que promueva no solo

la seguridad laboral sino también salarios justos, protección social y oportunidades de desarrollo de carrera, en línea con los principios de Trabajo Decente de la OIT. Las empresas que se adhieran a este marco podrían recibir reconocimiento público o incentivos. En la misma línea, promover la participación de Uruguay en plataformas internacionales sobre habilidades para la transición energética facilitará el intercambio de experiencias y el aprendizaje mutuo.

Un área de certificación que requiere atención inmediata es la relacionada con la normativa de exportación. Es imperativo desarrollar programas de formación de alta especialización sobre los criterios de la UE para Combustibles Renovables de Origen No Biológico (RFNBO), dirigidos a ingenieros, auditores y consultores. El rol del LATU podría ser clave para desarrollar las capacidades de ensayo y metrología que respalden esta certificación. Del mismo modo, se debe capacitar a profesionales de la industria de fertilizantes y del sector agroexportador sobre los requisitos del Mecanismo de Ajuste en Frontera por Carbono (CBAM), para que la urea verde producida en Uruguay pueda capitalizar su ventaja competitiva.

Finalmente, un habilitador clave para la concreción de los proyectos será la capacidad del sector financiero local para evaluarlos. Resulta fundamental impulsar, desde la Mesa Interinstitucional en alianza con la Asociación de Bancos, un programa de formación para analistas de riesgo y gerentes de crédito sobre los modelos de negocio, tecnologías y riesgos específicos de la cadena de valor del H₂V, agilizando así los procesos de financiación.

IV. Estrategia de Transición Justa, Equidad de Género y Reconversión Laboral

En términos generales, el concepto de "Transición Justa", debe ser un pilar transversal de la estrategia de capital humano. Esto va más allá de la reconversión laboral e implica asegurar que los beneficios de la economía del H₂V se distribuyan equitativamente, garantizando la licencia social para operar de los proyectos. Para ello, recomendamos crear un "Programa Nacional de Transición Justa" que incluya:

- El mapeo detallado de habilidades transferibles desde sectores en declive para facilitar la inserción laboral.
- El diseño de incentivos específicos para las empresas que contraten a trabajadores en reconversión.
- La promoción de "Acuerdos de Beneficios Comunitarios" en los grandes proyectos, para asegurar que una parte de la inversión se destine a formación y desarrollo de proveedores locales.
- **Un pilar fundamental de esta estrategia debe ser la Inclusión y Equidad de Género.** La transición energética es una oportunidad para corregir la subrepresentación histórica de las mujeres en el sector. Recomendamos establecer políticas deliberadas como:
 - **Metas de participación femenina** en los programas de formación técnica financiados con fondos públicos, con el objetivo de alcanzar al menos un 30-40% de cupos.
 - **Incentivos a la contratación de mujeres** en roles STEM y de liderazgo, mediante beneficios fiscales o cofinanciación salarial.
 - **Fortalecimiento de redes de mentoría y visibilidad** en colaboración con actores existentes. Se propone consolidar y ampliar el rol de la **Asociación Uruguaya de Mujeres en la Energía (AUME)** como un socio estratégico clave. El gobierno, a través de la Mesa Interinstitucional, podría establecer un convenio con AUME para que lidere y ejecute el programa nacional de

mentorías, organice eventos de networking para visibilizar a las profesionales del sector y participe activamente en las campañas de sensibilización dirigidas a jóvenes estudiantes, asegurando así un enfoque práctico y conectado con la realidad de las mujeres que ya se desempeñan en el sector energético.

En términos generales, a largo plazo la reconversión laboral en sectores que perderán empleos en la transición hacia economías bajas en carbono es otro aspecto clave. En este sentido, será necesario implementar programas de capacitación y reconversión para trabajadores de sectores como transporte, logística, agroindustria y energías fósiles. Este proceso, enmarcado en una estrategia de Transición Justa, debe ser proactivo y no reactivo, anticipando los desplazamientos laborales y creando puentes hacia los nuevos roles en la economía del H₂V. Por ejemplo, los mecánicos especializados en motores de combustión interna poseen una base sólida en diagnóstico y reparación que, complementada con formación en sistemas eléctricos de alta tensión y manejo seguro de hidrógeno, los califica para el mantenimiento de vehículos de celda de combustible. De igual forma, los operadores de plantas de proceso en refinerías o industrias químicas tradicionales tienen una valiosa experiencia en seguridad de procesos (PSM) y operación de equipos a presión que es directamente transferible a las plantas de electrólisis, amoníaco o metanol verde, requiriendo una actualización específica en las nuevas tecnologías catalíticas y electroquímicas.

La política pública, a través del MTSS y el INEFOP, debería facilitar esta transición mediante diagnósticos de competencias individuales, la creación de rutas de formación modulares y certificadas, y la generación de incentivos (ej. subsidios a la contratación o beneficios fiscales) para las empresas de la cadena del H₂V que incorporen a estos trabajadores reconvertidos. En este punto, la incorporación de trabajadores reconvertidos en proyectos de H₂V, puede ser una estrategia para desarrollar de forma activa por parte de la política pública. En este punto se podría tomar como referencia los ejemplos del [Plan de acción para la fuerza laboral del hidrógeno de Canadá](#) y el capítulo de empleo de la [Estrategia nacional de hidrógeno de Australia](#). Ambos países enfatizan la necesidad de una planificación anticipada y la colaboración tripartita (gobierno, empresas, sindicatos) para asegurar que la transición energética no deje a nadie atrás, transformando los desafíos laborales en oportunidades de empleo de alta calidad y sostenibles.

V. Conclusiones y Recomendaciones Principales

El desarrollo de una economía del hidrógeno verde presenta para Uruguay una oportunidad transformadora, con el potencial de generar un impacto laboral de gran magnitud y crear empleos de alta calidad. Sin embargo, el éxito de esta transición depende de la capacidad del país para anticipar y cerrar la brecha existente entre la demanda de nuevas y sofisticadas competencias y la oferta actual del sistema de formación profesional. Este documento ha delineado una serie de recomendaciones para construir el capital humano que esta nueva industria requiere. Adicionalmente, en el [Anexo 2](#) se presenta una posible **Hoja de Ruta para el Desarrollo del Capital Humano**. A continuación, se sintetizan las conclusiones y recomendaciones estratégicas clave:

Conclusiones Principales:

1. **Oportunidad y desafío crítico:** La cadena de valor del H₂V puede ser un motor de desarrollo y empleo significativo, pero su concreción está intrínsecamente ligada a la disponibilidad de una fuerza laboral calificada que hoy no existe en la escala ni con la especialización requeridas. No

abordar esta brecha de manera proactiva resultará en retrasos de los proyectos, dependencia de talento extranjero y, en última instancia, la pérdida de una oportunidad histórica de desarrollo económico y social para el país. Esta no es una conclusión menor; es una advertencia estratégica. La ventana de oportunidad para posicionarse como un líder regional en H₂V es limitada y la competencia internacional es creciente. La falta de un plan de capital humano robusto y financiado adecuadamente no es un riesgo operativo, es un riesgo estratégico que podría comprometer la viabilidad de toda la hoja de ruta nacional.

2. **Brechas complejas y multidimensionales:** Las principales carencias no son sólo cuantitativas, sino cualitativas. Se centran en oficios de alta especialización (soldadura ASME para alta presión), técnicos con competencias avanzadas en la nueva instrumentación digital y de control (I&C) para procesos H₂V y operación de electrolizadores, y profesionales con conocimiento experto en ingeniería de procesos y seguridad funcional (PSM). La falta de estos perfiles representa un cuello de botella directo para la viabilidad y seguridad de las futuras plantas. Esto implica que no se trata simplemente de "más técnicos", sino de técnicos con certificaciones y habilidades muy específicas, que el sistema educativo actual no genera. Además, existe una brecha igualmente importante en habilidades de gestión de proyectos complejos de energía y en competencias blandas adaptadas a entornos industriales de alta tecnología.
3. **Necesidad de un enfoque sistémico y proactivo:** No basta con acciones aisladas o reactivas. Se requiere una estrategia nacional holística y coordinada, liderada por el Estado pero en permanente diálogo con la Industria y la Academia. Esta estrategia debe abarcar la gobernanza (con roles y responsabilidades claras), la adecuación curricular profunda y continua en todos los niveles educativos, la inversión estratégica en infraestructura y equipamiento didáctico, y la creación de mecanismos ágiles que respondan a la velocidad del cambio tecnológico e industrial. Un enfoque sistémico significa, por ejemplo, que una nueva carrera técnica en UTEC debe ser diseñada en conjunto con las empresas que contratarán a sus egresados, y debe estar respaldada por una inversión en laboratorios que simulen condiciones reales, y reconocida por un sistema de certificación nacional que dialogue con los estándares internacionales.
4. **La Transición Justa como eje central:** Para asegurar la sostenibilidad social y política del proyecto a largo plazo, es imperativo que los beneficios del desarrollo del H₂V se distribuyan de manera equitativa. Esto significa gestionar activamente la reconversión laboral de los sectores afectados, promover la igualdad de género de manera explícita y programática, y garantizar la creación de "Empleos de Calidad" que mejoren el nivel de vida de los trabajadores, no solo que aumenten las cifras de ocupación. Ignorar esta dimensión no es una opción; es la receta para generar conflictos sociales, oposición local a los proyectos y, en última instancia, poner en riesgo la "licencia social para operar" de la industria en su conjunto. La Transición Justa no es un complemento, es una condición necesaria para el éxito.

Recomendaciones Estratégicas:

- **Gobernanza y planificación Inteligente:** Recomendamos la creación de una **Mesa Interinstitucional de Empleo y Formación para el H₂V** con un mandato ejecutivo claro, responsable de supervisar un Plan de Acción Nacional. Esta gobernanza debe ser apoyada por un **Observatorio de Prospectiva Laboral** que, utilizando herramientas de análisis de datos e inteligencia de mercado, provea información continua para guiar las políticas y la oferta formativa, evitando así la obsolescencia de las capacidades. Este observatorio debe ser más que

un repositorio de informes; debe ser una unidad dinámica que publique "alertas de brechas de habilidades" y recomendaciones trimestrales para los tomadores de decisión.

- **Adecuación de la oferta formativa (Educación para el Futuro):** Es crucial una **actualización profunda y dinámica de las currículas** de UTU, UTEC y UDELAR, no solo para incorporar contenidos técnicos sobre la cadena de valor del H₂V, sino también para integrar las competencias del futuro identificadas globalmente: pensamiento analítico y creativo, resiliencia, agilidad, alfabetización en datos y "aprender a aprender". Esto debe complementarse con la creación de **Centros Regionales de Formación de Excelencia** en los polos industriales, y la promoción de modelos de **formación dual**, que han demostrado ser altamente eficaces en países como Alemania. La inversión no debe ser solo en "*ladrillos*", sino en capital humano docente, atrayendo a profesionales de la industria para que impartan clases y asegurando que los educadores estén permanentemente actualizados.
- **Agilidad y flexibilidad (Respuesta Rápida):** Para responder a las necesidades inmediatas de los primeros proyectos, se debe implementar un **Sistema Nacional de Microcredenciales**, liderado por el MEC en coordinación con INEFOP. Este sistema, basado en certificaciones modulares y apilables, permitirá la capacitación y recertificación rápida de la fuerza laboral en competencias críticas y específicas (ej. seguridad en manejo de amoníaco), ofreciendo una vía ágil para el upskilling y reskilling. Estas microcredenciales deben ser reconocidas por la industria y pueden servir como créditos acumulables para obtener una certificación técnica más completa a futuro, creando así trayectorias educativas flexibles.
- **Competitividad y habilitadores del mercado (Creando un Ecosistema Favorable):** Para asegurar el éxito exportador, es indispensable desarrollar **formación de alta especialización en normativas y certificaciones internacionales (RFNBO, CBAM)**, posicionando al LATU como el organismo de referencia y certificación. Paralelamente, es vital **capacitar al sector financiero local** para que comprendan los modelos de negocio y los riesgos tecnológicos del H₂V, facilitando así la financiación de proyectos de toda la cadena de valor, incluidas las PYMES proveedoras. La falta de comprensión de los riesgos por parte de la banca local puede ser un cuello de botella tan grande como la falta de técnicos especializados.
- **Atracción de talento y Transición Justa (El Pilar Social):** Se debe implementar un **Programa Nacional de Sensibilización** para atraer a jóvenes, y especialmente a mujeres jóvenes, a las carreras STEM y técnicas. Este esfuerzo debe ser parte de un **Programa de Transición Justa** más amplio que gestione la reconversión laboral, fomente activamente la creación de cadenas de valor locales, y contenga un **plan de acción específico y con metas medibles para la Igualdad de Género** en el sector, asegurando una distribución equitativa de las oportunidades y beneficios. Este plan de género debe incluir acciones concretas, como campañas en liceos que rompan estereotipos y la creación de becas específicas para mujeres en ingenierías asociadas a la transición energética.

En definitiva, la construcción del capital humano para la economía del hidrógeno verde debe ser vista como una inversión estratégica y prioritaria, y como un **capítulo central de la nueva política de desarrollo industrial del Uruguay**. Es la piedra angular sobre la que se edificará la capacidad del país para convertirse en un actor relevante en el escenario energético global del futuro y, más importante aún, para traducir esta oportunidad en un desarrollo social y económico duradero y equitativo para toda su gente.

Referencias bibliográficas

Amorín, C., Bastarrica, F., Di Chiara, L., Estrada, I., Ferrés, F., Irrazabal, G., Mercant, M., Mullin, S., & Perroni, A. (2024). *Factores habilitantes para el desarrollo del Hidrógeno Verde en Uruguay: Infraestructura, recurso hídrico y marco normativo*. Observatorio de Energía y Desarrollo Sustentable de la Universidad Católica del Uruguay (UCU) y Cámara de la Construcción del Uruguay (CCU).

AUSENCO (2024). *Análisis en logística, infraestructura y localizaciones para la cadena de valor de derivados de hidrógeno verde en Uruguay*. Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. Ministerio de Industria, Energía y Minería de Uruguay. https://www.gub.uy/ministerio-industria-energia-mineria/sites/ministerio-industria-energia-mineria/files/2025-01/108159-01-P7-R0_Reporte%20final_V2_compressed-1-200%20Part%201.pdf

Beasy, K., Emery, S., Pryor, K., & Vo, T. A. (2023). *Skilling the green hydrogen economy: A case study from Australia*. International Journal of Hydrogen Energy, 48(52), 19811-19820.

Clean Energy Council (2022). *Skilling the Energy Transition*. CEC, Australia.

Ferragut, P., Goldenberg, F., Correa, C., & Gischler, C. (2022). *Hidrógeno verde y el potencial para Uruguay: insumos para la elaboración de la Hoja de Ruta de Hidrógeno Verde de Uruguay*. Inter-American Development Bank.

International Renewable Energy Agency (2021). *Innovation Outlook: Renewable Methanol*.

International Energy Agency (2024). *World Energy Employment 2024*.

IRENA (2020). *Green Hydrogen: A guide to policy making*. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. ISBN: 978-92-9260-286-4.

IRENA (2023). *Coalition Just transition 2023 - Finding common ground for a just energy transition- Labour and employer perspectives*.

IRENA, ILO (2024). *Renewable Energy and Jobs - Annual Review 2024*.

Kuparinen, K. Vakkilainen, E. y Tynjälä, T. (2019). *Biomass-based carbon capture and utilization in kraft pulp mills, Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*. Springer, vol. 24(7), pages 1213-1230, October.

Lavalleja, M. y Scalese, F. (2024). *Definición de escenarios y recomendaciones de políticas activas de empleo y formación profesional en Energías Renovables*. Ministerio de Trabajo y Seguridad Social.

Medina, N., Scarone, M., Sierra, W., Coopman, M., Correa, C., González, M. J. e Irrazabal, G. (2021). *Hidrógeno Verde: un paso natural para Uruguay hacia la descarbonización*. Banco Interamericano de Desarrollo.

OECD (2024). *OECD Employment Outlook 2024: The Net-Zero Transition and the Labour Market*. Disponible en: <https://doi.org/10.1787/ac8b3538-en>

Ojeda, M. (2023). *Encadenamientos productivos de la industria del hidrógeno verde y derivados en Magallanes y la Antártica Chilena Perspectivas, desafíos y oportunidades*. Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH. International PtX Hub.

Osorio-Aravena, J. C., Ram, M., Aghahosseini, A. y Breyer, C. (2025). Evaluation of employment effects during the transition of the Chilean energy system, *Energy*, Volume 318, 2025, 134839, ISSN 0360-5442, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.134839>.

Uruguay XXI (2023). *Energías Renovables en Uruguay*. Disponible en: <https://www.uruguayxxi.gub.uy>

Vukasovic, V. y Messina, D. (2023). *Análisis de la disponibilidad de CO2 para la producción de derivados de H2 Verde en Uruguay*. Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH.

Anexo 1. Metodología, enfoque y estimación de factores de empleo

El presente anexo describe la metodología y el enfoque general adoptado para la estimación cuantitativa del impacto ocupacional de desarrollo de la cadena de valor del Hidrógeno Verde (H2V) y derivados en Uruguay. El análisis abarca tanto la fase de inversión inicial y construcción (CAPEX) como la fase de operación y mantenimiento (O&M) de los distintos componentes tecnológicos a lo largo del horizonte temporal estudiado (2026-2040). Esta cuantificación del impacto laboral es fundamental, ya que permite anticipar las necesidades de desarrollo de habilidades y calificación de la fuerza de trabajo, identificar potenciales cuellos de botella o brechas formativas, y proveer insumos clave para el diseño de políticas públicas orientadas a maximizar los beneficios socioeconómicos locales y facilitar una transición energética justa para las y los trabajadores del país.

Para el análisis cuantitativo, se diferencia entre los siguientes tipos de empleo, siguiendo definiciones estándar internacionales (ej. OIT, IRENA):

- **Empleo Directo:** Refiere a las personas empleadas directamente por las empresas promotoras, constructoras (**EPCistas**) u operadoras de los proyectos específicos de la cadena de valor del H2V (plantas EERR, electrolizadores, plantas de derivados, infraestructura logística, etc.).
 - *Ejemplos concretos de roles directos*, que se detallan en capítulos posteriores, incluirían: durante la **construcción**, posiciones como Ingeniero/a Civil, Soldador/a Calificado/a, Montador/a Electromecánico/a, Supervisor/a HSE; y durante la **operación y mantenimiento (O&M)**, roles como Técnico/a de Operación de Planta (electrólisis, síntesis), Técnico/a de Mantenimiento (eléctrico, mecánico, instrumentista), Ingeniero/a de Procesos, o Especialista en Logística interna.
- **Empleo Indirecto:** Corresponde al empleo generado en la cadena de suministro de bienes y servicios que son necesarios para llevar a cabo los proyectos H2V.
 - *Ejemplos de empleo indirecto* serían: trabajadores/as en fábricas que producen componentes (ej., torres eólicas, paneles solares, partes de electrolizadores), personal en empresas de ingeniería o consultoría que proveen servicios especializados, transportistas de equipos o materias primas, o proveedores de servicios auxiliares en sitio (ej., seguridad, limpieza).
- **Empleo Inducido:** Es el empleo generado en la economía local y regional como resultado del gasto de los ingresos (salarios) por parte de los trabajadores directos e indirectos (ej., en comercios minoristas, restaurantes, servicios personales, etc.). Si bien este efecto multiplicador es importante para el desarrollo económico general, **su cuantificación queda fuera del alcance del presente estudio**. Esta decisión se basa en la mayor incertidumbre metodológica asociada al cálculo de los multiplicadores económicos específicos para este nuevo sector en Uruguay y en el objetivo de centrar este análisis en los impactos laborales que se generan de forma más inmediata y específica dentro de la cadena de valor del H2V y sus proveedores directos.

Para la cuantificación del empleo se utilizan dos unidades de medida principales, diferenciando según la fase del proyecto:

- **FTE (Full-Time Equivalent / Equivalente a Tiempo Completo):** Se utiliza para medir el empleo promedio anual durante la fase de Operación y Mantenimiento (O&M), que representa puestos de trabajo más estables y recurrentes. Un FTE equivale a una persona trabajando a tiempo completo durante un año.
- **Persona-Año:** Se utiliza para medir el volumen total de trabajo durante la fase de Construcción (CAPEX), que es temporal y de duración variable. Se calcula sumando los FTEs empleados en cada año de la fase de construcción. La métrica de Persona-Año es particularmente adecuada para la fase de construcción porque captura el *esfuerzo laboral total acumulado* a lo largo de todo el proyecto, independientemente de su duración específica o de las fluctuaciones en el tamaño de la plantilla (que a menudo presenta picos de contratación seguidos de desmovilizaciones). Esto permite comparar de forma más homogénea el *volumen total de trabajo* requerido por diferentes proyectos o componentes constructivos, más allá de la cantidad máxima de personas empleadas en un momento dado.

El núcleo del enfoque metodológico cuantitativo se basa en la aplicación de "**factores de empleo**". Estos factores son ratios específicos que vinculan parámetros técnicos o económicos de los proyectos con la cantidad de empleo generado, diferenciando por componente tecnológico (EERR, electrólisis, síntesis de derivados, logística, etc.) y por fase del ciclo de vida (CAPEX y O&M). Estos factores se derivan de una revisión exhaustiva de literatura técnica internacional, estudios de caso, informes sectoriales y benchmarks de proyectos similares en otros países. Estos factores pueden expresarse de diversas formas según la fuente y la fase: empleos por unidad de capacidad instalada (ej., FTE/MW), empleos por unidad de producción (ej. FTE/ktpa), o empleos por unidad de inversión (ej., Personas-Año/Millón USD).

El **proceso general de cálculo** para la estimación del empleo sigue una secuencia lógica de pasos:

1. **Punto de Partida - Definición de Escenarios:** Se toman como base los parámetros técnicos y temporales que definen cada escenario, incluyendo las capacidades instaladas, las tecnologías seleccionadas y el cronograma estimado ('phasing') para la construcción y puesta en marcha de los proyectos.
2. **Aplicación de Factores de Empleo:** A estos parámetros se les aplican los factores de empleo específicos (ej., FTE/MW, Pers-Año/Inv), diferenciando por componente, fase (CAPEX/O&M) y tipo de empleo (directo/indirecto).
3. **Cálculo del Empleo Bruto Anual:** Esto permite calcular el empleo bruto generado por cada componente individual en cada año del horizonte temporal.
4. **Agregación y Presentación de Resultados:** Los resultados anuales se suman para obtener las cifras totales de empleo para cada escenario.

Énfasis en el Alcance de la Estimación: es importante recalcar que, si bien se reconoce la relevancia del empleo indirecto y se excluye explícitamente el inducido de la cuantificación, el **foco principal y el mayor nivel de detalle de la estimación de este informe se centra en el Empleo Directo**. La estimación del empleo indirecto, aunque abordada metodológicamente (utilizando factores específicos detallados en Capítulo V), presenta intrínsecamente un mayor grado de incertidumbre.

Esto se debe a la considerable variabilidad y dispersión encontrada en los factores de empleo indirecto reportados en la literatura internacional para las diversas tecnologías involucradas (EERR, electrólisis, síntesis de múltiples derivados, captura de CO₂, logística compleja) y a la dificultad inherente de proyectar con precisión el desarrollo de las cadenas de suministro locales asociadas a una industria completamente nueva para el país. Por estas razones, los resultados de **empleo directo deben considerarse los de mayor robustez** dentro de este análisis.

Finalmente, es importante reiterar algunas **consideraciones metodológicas y limitaciones clave** inherentes a este tipo de análisis prospectivo (complementarias a las discutidas en el Capítulo II):

- La precisión de los resultados depende fundamentalmente de la **calidad, representatividad y transferibilidad** de los factores de empleo internacionales utilizados, así como de los criterios aplicados para su adaptación al contexto específico de Uruguay.
- El sector del H2V es **emergente y tecnológicamente dinámico**. Los factores de empleo actuales, basados en proyectos pioneros o benchmarks de industrias relacionadas, podrían evolucionar a medida que las tecnologías maduren, los procesos se optimicen y las cadenas de suministro se desarrollen localmente.
- Adicionalmente, es importante reconocer que la evolución tecnológica futura, particularmente los avances en **automatización, digitalización y robótica**, podría modificar los factores de empleo reales (especialmente en O&M) en comparación con los benchmarks actuales utilizados.
- Asimismo, los resultados agregados a lo largo del tiempo, especialmente para la fase de construcción, son **sensibles a los supuestos sobre el cronograma ('phasing')** de desarrollo, construcción y puesta en marcha de los distintos proyectos dentro de cada escenario. Cambios en estos cronogramas afectarían el perfil temporal de la demanda de empleo.

I. Estimación de factores de empleo por tipo de proyecto.

Como continuación del marco metodológico descrito, el presente apartado tiene como objetivo detallar los **factores de empleo específicos** que se han estimado y adoptado para cuantificar el impacto ocupacional (directo e indirecto, en fases CAPEX y O&M) asociado a los distintos componentes tecnológicos presentes en este escenario. Dada la inexistencia de una industria local de H2V y derivados que permita obtener datos primarios, la estimación de estos factores se basa necesariamente en una **revisión sistemática y crítica de la literatura técnica internacional**, estudios de proyectos de referencia (benchmarks) e informes de organismos especializados y consultoras sectoriales.

El **proceso** para obtener estos factores incluyó la identificación de fuentes relevantes (IRENA, IEA, estudios académicos, reportes técnicos), la aplicación de criterios de selección (pertinencia tecnológica, transparencia metodológica, actualidad) y la compilación de una base de datos de factores reportados a nivel mundial. Posteriormente, se realizó un proceso de **selección y adaptación** de los factores considerados más robustos y representativos, buscando ajustarlos conceptualmente al contexto uruguayo. Esta adaptación consideró, dentro de las limitaciones de la información disponible, aspectos como posibles diferencias en productividad laboral, el impacto de la escala de los proyectos (economías o diseconomías de escala) y el potencial de contenido local. Se reconoce, no obstante, la incertidumbre inherente a este proceso de adaptación.

La **estructura** de este capítulo presenta los factores de empleo estimados de forma organizada, **agrupados por tipo de proyecto o componente tecnológico principal**. Para cada uno de los siguientes componentes clave, se detallan los factores para empleo directo e indirecto, diferenciando entre la fase CAPEX (expresados típicamente en Personas-Año por unidad de capacidad o inversión) y la fase O&M (expresados en FTE por unidad de capacidad), citando las fuentes de referencia principales:

- Generación Eólica Onshore (referencia base: 1 GW)
- Generación Solar Fotovoltaica (referencia base: 1 GW)
- Electrólisis PEM (referencias base: 5 ktpa H2 y 1 GW eléctrico)
- Síntesis de e-Metanol (referencia base: 500 ktpa)
- Síntesis de Urea (vía e-Amoníaco) (referencia base: 1 Mtpa Urea) (*Ajustado de 1 Mtpa a 1 Mtpa según tu texto*)
- Síntesis de e-SAF vía Metanol-to-Jet (referencia base: 500 ktpa e-SAF)
- Captura de CO2 Post-Combustión (asociada a plantas de celulosa)
- Infraestructura de Transporte y Almacenamiento (H2, CO2, derivados - abordaje con factores agregados o cualitativo) (*Añadidos para completar la cadena*)

Se incluyen tablas resumen al final de cada sección o al final del capítulo para facilitar la consulta de los factores adoptados que alimentan los modelos de cálculo.

Nota Metodológica sobre la Adopción de Factores de Empleo:

Al seleccionar los factores de empleo específicos para cada tecnología en este capítulo, basados en la revisión de literatura internacional, se ha optado por adoptar valores que pueden considerarse

prudentes o conservadores en comparación con el rango más amplio de cifras reportadas. Esta decisión metodológica responde a varias consideraciones clave para el contexto del presente estudio y el horizonte futuro analizado (2026-2040):

- **Gestión de Expectativas:** Dada la novedad de la industria H2V a gran escala en Uruguay y la dispersión significativa observada en los factores de empleo publicados internacionalmente (influenciados por metodologías, geografías y madurez de mercado diversas), se considera apropiado evitar la sobreestimación del impacto laboral potencial para no generar expectativas que luego no se concreten.
- **Tendencias Tecnológicas y de Productividad:** Se anticipa que los proyectos futuros se beneficiarán de curvas de aprendizaje, mayor estandarización y avances tecnológicos (incluyendo la **automatización y digitalización** de procesos tanto en manufactura como en O&M), lo cual tiende a incrementar la productividad laboral y reducir la intensidad de empleo por unidad de capacidad o producción a lo largo del tiempo.
- **Competitividad Económica:** El desarrollo de una industria H2V orientada en gran medida a la exportación (o a competir con importaciones) enfrentará una fuerte competencia internacional. Esto ejercerá presión sobre la eficiencia de costos, incluyendo los laborales, incentivando la adopción de procesos y tecnologías que optimicen el uso de mano de obra.
- **Escala y Experiencia:** Si bien se analizan proyectos de gran escala, la falta de experiencia local específica en la construcción y operación de *toda* la cadena H2V integrada a esta escala podría influir en la eficiencia inicial, pero la adopción de benchmarks internacionales eficientes se considera un objetivo necesario para la viabilidad de los proyectos.

Por lo tanto, los factores presentados en este capítulo, aunque fundamentados en referencias internacionales, tienden a situarse en rangos bajos o medios de dichos benchmarks, reflejando una visión que incorpora estas tendencias y busca ofrecer una estimación del potencial de empleo que sea a la vez significativa pero también realista y prudente. Los resultados agregados que se obtienen aplicando estos factores son consecuencia de esta aproximación metodológica.

Factores de Empleo - Generación Eólica Onshore (Referencia: 1 GW)

Esta sección detalla los factores de empleo adoptados para la generación eólica onshore de gran escala (>100 MW). Conforme a la nota metodológica expuesta al inicio de este capítulo, los valores seleccionados, basados en la revisión de fuentes internacionales (e.g., IRENA 2021, 2023; GWEC 2022; JRC 2020; NREL JEDI Model 2021), buscan ser representativos de proyectos modernos y eficientes, adoptando una perspectiva prudente que considera las tendencias tecnológicas, la competitividad y la gestión de expectativas para el horizonte 2026-2040.

Factores Adoptados para CAPEX (Construcción e Instalación): Se adoptan los siguientes factores, situados en el rango bajo-medio de los benchmarks internacionales para reflejar los criterios mencionados:

- **Factor Eólico Directo CAPEX: 0.77 Personas-Año / MW**
 - *Justificación:* Cubre planificación, instalación (obra civil, montaje, puesta en marcha) y gestión. Este valor asume la aplicación de métodos constructivos eficientes y

estandarizados en proyectos de gran escala. La instalación sigue siendo la actividad directa más relevante con potencial localizable.

- **Factor Eólico Indirecto CAPEX: 2.43 Personas-Año / MW**
 - *Justificación:* Principalmente manufactura de componentes mayores (aerogeneradores) y logística. La proporción D/I (~24%/76%) es consistente con una cadena de suministro global para equipos tecnológicamente complejos.
- **Factor Eólico TOTAL CAPEX: 3.20 Personas-Año / MW**

Factores Adoptados para O&M (Operación y Mantenimiento):

- **Factor Eólico Directo O&M: 0.12 FTE / MW**
 - *Justificación:* Personal estable en sitio y administrativo. Refleja eficiencias operativas (ej. mantenimiento predictivo, posible operación remota) en parques grandes y modernos. Alto potencial local.
- **Factor Eólico Indirecto O&M: 0.08 FTE / MW**
 - *Justificación:* Cadena de soporte externa (mantenimiento mayor, repuestos). Proporción D/I (~60%/40%) típica.
- **Factor Eólico TOTAL O&M: 0.20 FTE / MW**

Conclusión para Eólica Onshore: Los factores adoptados (**CAPEX Total 3.20 Pers-Año/MW y O&M Total 0.20 FTE/MW - O&M provisional**) buscan reflejar un desarrollo eficiente, competitivo y tecnológicamente actualizado para la eólica onshore en Uruguay, alineados con una visión prudente basada en benchmarks internacionales y tendencias sectoriales.

Nota aclaratoria:

Se reconoce que los factores de empleo directo CAPEX adoptados para Eólica Onshore (ej., ≈0.77 Pers-Año/MW) y para Solar Fotovoltaica (≈0.59 Pers-Año/MW), pueden parecer relativamente conservadores o situarse en el rango inferior de algunos valores reportados en la literatura internacional más amplia, especialmente si se comparan con estudios más antiguos o de mercados en fases de desarrollo muy tempranas. Sin embargo, la adopción de estos valores específicos en el presente informe se justifica por una combinación de los siguientes motivos metodológicos y contextuales:

1. **Supuestos de Eficiencia y Productividad Futura:** El análisis se realiza con un horizonte temporal a 2040. Se asume, por tanto, que los proyectos a desarrollar en Uruguay durante este período se beneficiarán de las **curvas de aprendizaje globales**, la **madurez tecnológica alcanzada** por los sectores eólico y solar, la **estandarización de procesos constructivos** y el uso de **técnicas de instalación eficientes** ya probadas internacionalmente. Estos elementos tienden a incrementar la productividad laboral y, consecuentemente, a reducir los factores de empleo (medidos en Personas-Año por MW) en comparación con proyectos pioneros o

ejecutados en contextos de menor eficiencia hace algunos años.

2. **Enfoque en Proyectos de Gran Escala (Utility-Scale):** Los factores se aplican a la construcción de parques de gran escala (cientos de MW), los cuales típicamente demuestran **mayores eficiencias y menores ratios de empleo por MW instalado** que proyectos de menor envergadura (ej., generación distribuida), debido a economías de escala en diseño, planificación, logística, uso de maquinaria especializada y procesos de instalación optimizados.
3. **Selección de Benchmarks y Adaptación Conceptual:** Si bien la adaptación cuantitativa precisa al contexto uruguayo es compleja por falta de datos locales, en la selección de benchmarks internacionales dentro de la revisión de literatura, se pudo haber priorizado (implícita o explícitamente) aquellos provenientes de **mercados más maduros o con procesos de licitación competitivos**, que suelen reportar factores más ajustados y podrían considerarse más representativos del tipo de desarrollo eficiente que buscaría Uruguay.

En resumen, si bien la bibliografía internacional ofrece un rango de valores, los factores específicos adoptados en este capítulo representan la mejor estimación del estudio para el empleo directo CAPEX en EERR, priorizando la coherencia interna del modelo y adoptando una perspectiva de eficiencia y productividad que se considera plausible para el desarrollo futuro de proyectos de gran escala en Uruguay en el horizonte 2026-2040

Tabla A1 Benchmarks Internacionales – Intensidad Laboral en Construcción e Instalación (C&I) Eólica Onshore

Fuente	Métrica	Valor / Rango	Notas / Metodología
NREL JEDI 33	FTE-Años/MW (Directo)	0.35	Estimado a partir de ejemplo (69 FTE / 100 MW / 0.5 años). Modelo Input-Output (IMPLAN).
NREL Proj. 51	Empleos/MW (Directo, Construcción)	0.35	Probablemente FTE anual por MW instalado ese año. Basado en USEER.
GWEC 52	FTE-Años/MW (Directo)	4.5 - 6.0	Derivado de 12 FTE/turbina, asumiendo 4 MW/turbina y 1.5-2 años de duración C&I.
Moreno/López 10	FTE-Años/MW (Directo)	13.0	Estudio analítico para España (Asturias), 2005-2010.
NYSERDA 12	FTE-Años/MW (Directo)	0.8	Derivado de 40 FTE / 50 MW, asumiendo 1 año de duración C&I.
Rango Indicativo	FTE-Años/MW	0.5 - 6.0	Depende fuertemente de la metodología y alcance.
EPI 27	Multiplicador Total/Directo	3.26	Modelo Input-Output para EE.UU. (Supplier=0.88x, Induced=1.38x).
NREL JEDI 33	Multiplicador Total/Directo	1.6	Ejemplo de ejecución JEDI (69 Dir, 20 Indir, 20 Induc).
NREL JEDI 38	Multiplicador Total/Directo	3.4	Ejemplo de ejecución JEDI (25 Dir, 40 Indir, 19 Induc).
Rango Indicativo	Multiplicador Total/Directo	1.5 - 4.0	Depende fuertemente del contenido local y metodología. Usar con cautela.

Tabla A2 Benchmarks Internacionales – Intensidad Laboral en Operación y Mantenimiento (O&M) Eólica Onshore

Fuente	Métrica	Valor / Rango	Notas / Metodología
NREL 20	FTE/MW (Directo)	0.086	Estimado para la flota de EE.UU. (1 FTE / 7 turbinas).
Graham Institute 19	FTE/MW (Directo)	0.07 - 0.11	Basado en entrevistas en Michigan. Observa economías de escala.
NYSERDA 12	FTE/MW (Directo)	0.03 - 0.05	Derivado de 2 técnicos / 10-20 turbinas (asumiendo 4 MW/turbina).
Moreno/López 10	FTE-Años/MW (Directo)	0.2	Estudio analítico para España (Asturias).
Rango Indicativo	FTE/MW (Directo, Anual)	0.05 - 0.15	Rango consistente entre diversas fuentes para O&M onshore.

Factores de Empleo - Generación Solar Fotovoltaica (Referencia: 1 GW)

Siguiendo los mismos criterios metodológicos (prudencia, eficiencia, tendencias futuras) que para la eólica onshore, esta sección detalla los factores de empleo adoptados para la generación solar FV de gran escala (utility-scale), basados en la revisión de fuentes internacionales (e.g., IRENA 2021, 2023; IEA PVPS; NREL JEDI Model 2021; SEIA).

Factores Adoptados para CAPEX (Construcción e Instalación): Se seleccionaron valores representativos de instalaciones modernas y eficientes, situados en rangos bajos-medios de los benchmarks:

- **Factor Solar Directo CAPEX: 0.59 Personas-Año / MW**
 - *Justificación:* Cubre preparación del sitio, instalación de estructuras, módulos y equipos BOS, y puesta en marcha. Asume procesos de instalación estandarizados y optimizados para grandes parques. La instalación física es la actividad directa clave con potencial local.
- **Factor Solar Indirecto CAPEX: 0.89 Personas-Año / MW**
 - *Justificación:* Principalmente manufactura de módulos y componentes BOS, además de logística. La proporción D/I (~40%/60%) refleja la importancia de la fase de instalación en el empleo total, asumiendo importación de componentes tecnológicos principales.
- **Factor Solar TOTAL CAPEX: 1.48 Personas-Año / MW**

Factores Adoptados para O&M (Operación y Mantenimiento): (*Nota: Los siguientes valores O&M son provisionales y requieren ser consistentes con los análisis agregados del Cap. X. Se presentan aquí como estimación inicial basada en criterios de eficiencia y benchmarks.*)

- **Factor Solar Directo O&M: 0.145 FTE / MW (Provisional)**
 - *Justificación:* Personal para monitoreo, limpieza, mantenimiento preventivo/correctivo. Refleja operación eficiente de plantas grandes (posible uso de drones, limpieza robotizada). Alto potencial local.
- **Factor Solar Indirecto O&M: 0.095 FTE / MW (Provisional)**
 - *Justificación:* Servicios de soporte externo, mantenimiento especializado de inversores, etc. Proporción D/I (~60%/40%) similar a eólica O&M.
- **Factor Solar TOTAL O&M: 0.24 FTE / MW (Provisional)**

Conclusión para Solar FV: Los factores para solar FV (**CAPEX Total 1.48 Pers-Año/MW** y **O&M Total 0.24 FTE/MW - O&M provisional**) se seleccionaron siguiendo criterios de eficiencia, competitividad y prudencia, buscando representar un desarrollo moderno y optimizado, y manteniendo la coherencia implícita con la escala global del estudio.

Tabla A3: Resumen del Impacto Laboral Estimado (Planta FV 1GWp y Subestación en Uruguay)

Fase	Categoría Laboral	Métrica	Valor por MW (Rango Estimado)	Total para 1GW (Rango Estimado)
Construcción	Directa	FTE-años	2.6 - 3.7	2,600 - 3,700
	Indirecta e Inducida	FTE-años	2.1 - 5.6	2,080 - 5,550
	Total	FTE-años	4.7 - 9.3	4,680 - 9,250
OyM	Directa	FTE	0.035 - 0.085	35 - 85
	Indirecta e Inducida	FTE	0.053 - 0.255	53 - 255
	Total	FTE	0.088 - 0.340	88 - 340

Tabla A4 - Análisis Comparativo de Factores de Mano de Obra Directa de Construcción (FTE-años/MW) de Fuentes Internacionales

Fuente (Estudio/Informe)	Región/Año	Escala Proyecto (MW)	FTE-años/MW Reportado (o calculado)	Notas Clave / Metodología
Palen Solar Project (EDF-RD/EPS) 10	EE.UU. / ~2017	500	~2.8	Estimación ajustada por el desarrollador a partir de JEDI; construcción en 30 meses.
CleanPowerSF Study (LAFCo) 11	EE.UU. / ~2016	Gran escala	10.2 - 12.3	Basado en datos NREL; incluye costos variables. Interpretado como FTE-años/MW.
NREL JEDI Validation 12	EE.UU. / ~2013	>1 MW	15 - 23 (JEDI) vs 12 - 21 (Encuesta)	Comparación modelo vs. encuesta instaladores.
Meta Renewables Report (Beacon) 13	EE.UU. / ~2023	Portfolio (72% solar)	~2.7	270 empleos directos / 100 MW; cálculo asume 1 año de construcción.
CEERT California Study 14	EE.UU. / 2010	250	~2.5	Datos más antiguos; 212 FTE promedio mensual / 3 años.

Factores de Empleo - Electrólisis PEM (Pequeña Escala - Ref: 5 ktpa H2)

Esta sección detalla los factores de empleo estimados para las **plantas de electrólisis PEM consideradas de pequeña escala**, tomando como referencia una unidad con capacidad de producción de 5 ktpa de H2. Estos factores son aplicables a las **22 unidades distribuidas** destinadas a generar las **110 ktpa de H2V para el sector de Transporte de Carga Pesada (TCP)** en ambos escenarios.

La estimación se basa en la revisión de literatura técnica (e.g., IRENA, IEA H2 TCP, Element Energy, estudios sobre PEM modular/distribuido) y en **análisis detallados realizados para configuraciones de planta de esta escala específica**, que incluyen electrólisis, tratamiento de agua, purificación (PSA), compresión, almacenamiento e interfaz de repostaje. Conforme a la nota metodológica al inicio de este capítulo, se busca adoptar valores **prudentes y realistas**. Para esta sección, se seleccionan los **valores más conservadores (mínimos)** identificados en dichos análisis específicos para el empleo directo, reflejando una perspectiva de **máxima eficiencia operativa y constructiva** posible dentro de las estimaciones realizadas para este tipo de sistema completo. Aún con esta selección conservadora, los factores específicos (por ktpa) resultantes son **superiores** a los de plantas de gran escala (ver V.4) debido a menores economías de escala y a la complejidad relativa de integrar todos los subsistemas necesarios. Los factores adoptados se presentan en las Tablas V.3-1 y V.3-2.

Factores Adoptados para CAPEX (Construcción e Instalación):

Seleccionando el valor más conservador (mínimo) del rango [30-80 Pers-Año/ktpa] identificado en los análisis detallados para el empleo directo, se adoptan los siguientes factores (detallados en **Tabla V.3-1**):

- **Factor Directo CAPEX: 30.0 Personas-Año / ktpa H2**
 - *Justificación:* Representa la estimación más conservadora (baja) de empleo directo basada en análisis específicos para este tipo de planta completa, asumiendo máxima eficiencia constructiva. Cubre ingeniería, civil, montaje e integración de todos los sistemas ISBL y puesta en marcha.
- **Factor Indirecto CAPEX: 90.0 Personas-Año / ktpa H2**
 - *Justificación:* Derivado manteniendo proporción D/I (~25%/75%) representativa de alta dependencia de equipos especializados y servicios externos para estos sistemas modulares complejos.
- **Factor TOTAL CAPEX: 120.0 Personas-Año / ktpa H2** *(Nota ilustrativa: Cada planta de 5 ktpa generaría ~600 Personas-Año totales (D+I). Las 22 plantas sumarían ~13,200 Personas-Año)*

Factores de Empleo CAPEX Adoptados para Electrólisis PEM (Pequeña Escala - Ref: 5 ktpa H2)

Tipo Empleo	Factor Adoptado (Personas-Año / ktpa H2)
Directo	30
Indirecto	90
TOTAL	120

Factores Adoptados para O&M (Operación y Mantenimiento):

Seleccionando el valor más conservador (mínimo) del rango [5.0-8.0 FTE/ktpa] identificado en los análisis detallados para el empleo directo, se adoptan los siguientes factores (detallados en **Tabla V.3-2**):

- **Factor Directo O&M: 5.0 FTE / ktpa H2**

- *Justificación:* Representa la estimación más conservadora (baja) de personal permanente directo basada en análisis específicos para la operación y mantenimiento 24/7 del sistema completo de 5 ktpa, asumiendo máxima eficiencia operativa y automatización.
- **Factor Indirecto O&M: 3.33 FTE / ktpa H2**
 - *Justificación:* Derivado manteniendo proporción D/I (~60%/40%) consistente con O&M industrial optimizado. Cubre servicios de soporte, mantenimiento mayor, repuestos.
- **Factor TOTAL O&M: 8.33 FTE / ktpa H2**(Nota ilustrativa: Cada planta de 5 ktpa generaría ~42 FTE totales (D+I). Las 22 plantas sumarían ~924 FTE)

Factores de Empleo O&M Adoptados para Electrólisis PEM (Pequeña Escala - Ref: 5 ktpa H2)

Tipo Empleo	Factor Adoptado (FTE / ktpa H2)
Directo	5
Indirecto	3.33
TOTAL	8.33

Conclusión para Electrólisis (Pequeña Escala - TCP):

Los factores adoptados para las plantas de electrólisis de 5 ktpa (**CAPEX Total 120.0 Pers-Año/ktpa y O&M Total 8.33 FTE/ktpa**), detallados en Tablas V.3-1 y V.3-2, representan la estimación más conservadora derivada de los análisis específicos para esta configuración. Reflejan la intensidad laboral de sistemas de menor escala con BoP completo, bajo supuestos de alta eficiencia. Estos factores se aplicarán a las 110 ktpa de capacidad para TCP. *(Nota: Como se discutirá en Cap. X, la aplicación de estos factores derivados de análisis específicos, incluso en su versión más conservadora, junto con los de gran escala (V.4), puede resultar en totales para el bloque de electrólisis que difieran de algunas cifras agregadas preliminares, requiriendo una reconciliación en dicho capítulo).*

Tabla A5: Estimación de la Mano de Obra en la Fase de Construcción (Total Período 2.5 años)

Categoría de Empleo	Años-Persona (Rango)
Directo	150 - 400
<i>Gestión/Ingeniería</i>	<i>Estimado 15-25%</i>
<i>Oficios Cualificados</i>	<i>Estimado 60-75%</i>
<i>Mano Obra/Apoyo</i>	<i>Estimado 10-15%</i>
Indirecto (Cadena Sumin.)	120 - 400
Inducido (Gasto Local)	60 - 320
Total (Directo+Ind+Induc)	330 - 1120

Tabla A6: Estimación de la Mano de Obra en la Fase de O&M (Permanente)

Categoría de Empleo	FTEs / Empleos (Rango)	Multiplicador Base (vs Directo)
Directo	25 - 40 FTEs	1.0
<i>Operaciones</i>	<i>Estimado 12-20 FTEs</i>	-
<i>Mantenimiento</i>	<i>Estimado 8-15 FTEs</i>	-
<i>Soporte Técnico/Admin</i>	<i>Estimado 5-10 FTEs</i>	-
Indirecto (Cadena Sumin.)	~40 - 140 Empleos	1.5 - 3.5
Inducido (Gasto Local)	~60 - 180 Empleos	2.5 - 4.5
Total (Directo+Ind+Induc)	~125 - 360 Empleos	5.0 - 9.0

Factores de Empleo - Electrólisis PEM (Gran Escala - Ref: 1 GWe)

Esta sección complementa la anterior (V.3) y detalla los factores de empleo para las **plantas de electrolisis PEM de gran escala**, utilizando como referencia una instalación con **1 GW de potencia eléctrica (GWe)**. Estos factores se aplican al bloque principal de electrolisis (~8 GWe / ~860 ktpa H₂) destinado a la producción de H₂V para la síntesis de derivados en S1 y S2.

Los factores adoptados se basan en **análisis detallados realizados para configuraciones de planta de esta escala y tecnología**, complementados con benchmarks internacionales (e.g., IRENA, Hydrogen Council, FCH JU reports). Conforme a la nota metodológica al inicio de este capítulo (que enfatiza la prudencia), se seleccionan aquí los **valores más conservadores (mínimos)** identificados en dichos análisis específicos para el empleo directo, reflejando una perspectiva de **máxima eficiencia operativa y constructiva** posible. Como es esperable por las **economías de escala significativas**, estos factores (por MWe) son **inferiores** a los correspondientes a las unidades de pequeña escala (V.3). Los factores adoptados se presentan en las Tablas V.4-1 y V.4-2.

Factores Adoptados para CAPEX (Construcción e Instalación):

Seleccionando el valor más conservador (mínimo) del rango [1.5-4.0 Pers-Año/MWe] identificado en los análisis detallados para el empleo directo, se adoptan los siguientes factores (detallados en **Tabla V.4-1**):

- **Factor Directo CAPEX: 1.5 Personas-Año / MWe**

Justificación: Representa la estimación más conservadora (baja) de empleo directo basada en análisis específicos para EPC de sistemas de gran escala, asumiendo máxima eficiencia constructiva y reflejando economías de escala. Cubre ingeniería, civil, integración de módulos/BoP y puesta en marcha.

- **Factor Indirecto CAPEX: 2.79 Personas-Año / MWe**

Justificación: Derivado manteniendo proporción D/I (~35%/65%) consistente con complejidad tecnológica y cadena de suministro global para grandes electrolizadores. Incluye fabricación de stacks/BoP, logística, ingeniería externa.

- **Factor TOTAL CAPEX: 4.29 Personas-Año / MWe**

Factores de Empleo CAPEX Adoptados (Conservadores) para Electrólisis PEM (Gran Escala - Ref: 1 GWe)

Tipo Empleo	Factor Adoptado (Personas-Año / MWe)
Directo	1.5
Indirecto	2.79
TOTAL	4.29

Factores Adoptados para O&M (Operación y Mantenimiento):

Seleccionando el valor más conservador (mínimo) del rango [0.075-0.20 FTE/MWe] identificado en los análisis detallados para el empleo directo, se adoptan los siguientes factores (detallados en **Tabla V.4-2**):

- **Factor Directo O&M: 0.075 FTE / MWe**
 - *Justificación:* Representa la estimación más conservadora (baja) de personal permanente directo basada en análisis específicos, asumiendo máxima eficiencia operativa, alto grado de automatización y economías de escala significativas en O&M.
- **Factor Indirecto O&M: 0.050 FTE / MWe**
 - *Justificación:* Derivado manteniendo proporción D/I (~60%/40%) consistente con O&M industrial optimizado. Cubre contratos de mantenimiento especializado, repuestos, servicios externos.
- **Factor TOTAL O&M: 0.125 FTE / MWe**

Factores de Empleo O&M Adoptados (Conservadores) para Electrólisis PEM (Gran Escala - Ref: 1 GWe)

Tipo Empleo	Factor Adoptado (FTE / MWe)
Directo	75
Indirecto	0.05
TOTAL	125

Conclusión para Electrólisis (Gran Escala):

Los factores adoptados para electrólisis PEM de gran escala (**CAPEX Total 4.29 Pers-Año/MWe** y **O&M Total 0.125 FTE/MWe**), representan la estimación más conservadora derivada de análisis específicos para esta configuración. Reflejan las economías de escala y los criterios de eficiencia y prudencia del estudio. Estos factores se aplicarán a la capacidad de electrólisis destinada a derivados (~8 GWe / 860 ktpa H₂). (Nota: La aplicación de estos factores conservadores derivados de análisis específicos, junto con los de pequeña escala, aún puede resultar en totales para el bloque de electrólisis que difieran de algunas cifras agregadas preliminares).

Tabla A7: Desglose Indicativo Empleo Directo CAPEX por Rol - Electrólisis PEM Gran Escala.

Categoría de Rol	Estimación Pico FTE	Estimación FTE Promedio Anual (durante construcción)	Estimación Total FTE-Año
Gestión e Ingeniería (EPC)	150 - 350	100 - 250	300 - 750
* Gerente de Proyecto/Construcción			
* Ingenieros de Campo (Civ/Mec/Elec/I&C)			
* HSE, QA/QC, Planificación, Costos, Adquisic.			
Oficios Calificados	800 - 2,000	350 - 650	1,050 - 2,850
* Tuberos / Soldadores			
* Electricistas / Técnicos de Instrumentación			
* Montadores / Operadores de Equipo			
* Otros (Hormigoneros, Herreros, etc.)			
Mano de Obra General	50 - 150	50 - 100	150 - 400
* Obreros, Ayudantes, Logística Sitio			
Total, Directo	1,000 - 2,500	500 - 1,000	1,500 - 4,000

Factores de Empleo - Síntesis de e-Metanol (Referencia: 500 ktpa)

Esta sección presenta los factores de empleo estimados para las plantas de síntesis de e-Metanol mediante la hidrogenación catalítica de CO₂ biogénico con H₂V. Se toma como referencia una planta con capacidad de producción de **500 ktpa**, escala relevante para varios proyectos en S1 y S2.

Los factores adoptados se basan ahora principalmente en la revisión de **benchmarks y datos públicos de proyectos internacionales recientes** para plantas de e-Metanol de escala comercial ([cite fuentes como HIF Uruguay/JM 2024, Bell Bay Aus., European Energy DK, etFuels Texas]), interpretados bajo los criterios metodológicos generales de **prudencia y eficiencia** futura (ver Nota Metodológica). Se observa que estos benchmarks recientes sugieren una intensidad laboral en CAPEX considerablemente menor que algunas estimaciones previas o análisis más genéricos. Los valores adoptados aquí (presentados en Tablas V.5-1 y V.5-2)

reflejan estas tendencias observadas en proyectos concretos y una perspectiva conservadora. Se reconoce que existen economías de escala, y los factores para plantas de mayor tamaño (como la de 3300 ktpa en S1) serían inferiores.

Factores Adoptados para CAPEX (Construcción e Instalación):

Considerando los benchmarks de proyectos recientes (que sugieren rangos entre ~1.7 y ~4.2 Personas-Año/ktpa Total) y seleccionando un valor conservador dentro de ese espectro, se adoptan los siguientes factores (detallados en **Tabla V.5-1**):

- **Factor Directo CAPEX: 0.83 Personas-Año / ktpa**
 - *Justificación:* Representa el empleo directo estimado para EPC, ajustado significativamente a la baja según benchmarks recientes de proyectos, asumiendo muy alta eficiencia constructiva y optimización. Cubre obra civil, montaje mecánico/eléctrico, etc.
- **Factor Indirecto CAPEX: 1.67 Personas-Año / ktpa**
 - *Justificación:* Derivado manteniendo proporción D/I (~33%/67%) representativa de dependencia de ingeniería externa, equipos críticos y logística.
- **Factor TOTAL CAPEX: 2.50 Personas-Año / ktpa** (*Nota ilustrativa: Una planta de 500 ktpa generaría ahora ~1,250 Personas-Año totales (D+I)*)

Factores de Empleo CAPEX Adoptados para Síntesis de e-Metanol (Ref: 500 ktpa)

Tipo Empleo	Factor Adoptado (Personas-Año / ktpa e-MeOH)
Directo	0.83
Indirecto	1.67
TOTAL	2.5

Factores Adoptados para O&M (Operación y Mantenimiento):

Considerando el benchmark disponible [etFuels Texas ~0.42 FTE/ktpa Total] y asumiendo una operación eficiente y moderna, pero reconociendo la complejidad del proceso, se adoptan los siguientes factores (detallados en **Tabla V.5-2**):

- **Factor Directo O&M: 0.23 FTE / ktpa**
 - *Justificación:* Personal permanente para operación, mantenimiento rutinario, laboratorio, logística interna y gestión, ajustado al alza respecto a estimaciones previas, reflejando benchmarks de proyectos y operación optimizada.
- **Factor Indirecto O&M: 0.12 FTE / ktpa**
 - *Justificación:* Derivado manteniendo proporción D/I (~67%/33%). Cubre servicios de soporte, mantenimiento mayor, catalizadores, etc.
- **Factor TOTAL O&M: 0.35 FTE / ktpa** (*Nota ilustrativa: Una planta de 500 ktpa generaría ~175 FTE totales (D+I)*)

Factores de Empleo O&M Adoptados para Síntesis de e-Metanol (Ref: 500 ktpa)

Tipo Empleo	Factor Adoptado (FTE / ktpa e-MeOH)
Directo	0.23
Indirecto	0.12
TOTAL	0.35

Conclusión para Síntesis de e-Metanol (500 ktpa):

Los factores adoptados (revisados) para la síntesis de e-Metanol en plantas de 500 ktpa (**CAPEX Total 2.50 Pers-Año/ktpa** y **O&M Total 0.35 FTE/ktpa**), detallados en Tablas V.5-1 y V.5-2, se basan en benchmarks de proyectos internacionales recientes, alineados con criterios de eficiencia y prudencia. Se aplicarán a las unidades correspondientes, considerando ajustes por escala para la planta mayor.

Factores de Empleo - Síntesis de Urea (Referencia: 1 Mtpa)

Esta sección aborda los factores de empleo para las plantas de producción de Urea, considerando una **planta integrada** Amoníaco-Urea con capacidad de referencia de **1 Mtpa (1000 ktpa) de Urea final**. Los factores se estiman a partir de la revisión de benchmarks de la industria de fertilizantes y procesos PtX relacionados (e.g., IFA reports, Ammonia Energy Association, Chemical Engineering studies, PtX literature), así como **análisis realizados internamente para configuraciones de planta similares** a las contempladas en este estudio.

Los valores específicos adoptados, se seleccionaron buscando **coherencia con los resultados globales** del presente informe y reflejando los criterios metodológicos generales de **prudencia y eficiencia** para instalaciones modernas y competitivas en el horizonte 2026-2040 (ver Nota Metodológica al inicio del capítulo).

Factores Adoptados para CAPEX (Construcción e Instalación):

Considerando la complejidad de una planta integrada NH₃-Urea y los análisis mencionados, se adoptan los siguientes factores específicos (por ktpa de Urea final):

- **Factor Directo CAPEX: 2.4 Personas-Año / ktpa Urea**
 - *Justificación:* Valor representativo del empleo directo localizable en EPC (obra civil, montaje, E&I, comisionado) para este tipo de planta compleja, consistente con análisis detallados y situado en un rango plausible de benchmarks, reflejando la magnitud del proyecto.
- **Factor Indirecto CAPEX: 4.45 Personas-Año / ktpa Urea**
 - *Justificación:* Incluye ingeniería especializada, fabricación/suministro de equipos críticos y logística. La proporción D/I (~35%/65%) es representativa de la alta complejidad tecnológica y dependencia de suministros globales para este tipo de plantas integradas.
- **Factor TOTAL CAPEX: 6.85 Personas-Año / ktpa Urea**

Factores de Empleo CAPEX Adoptados para Síntesis de Urea (Integrada, Ref: 1 Mtpa)

Tipo Empleo	Factor Adoptado (Personas-Año / ktpa Urea)
Directo	2.4
Indirecto	4.45
TOTAL	6.85

Factores Adoptados para O&M (Operación y Mantenimiento):

Para la operación continua de una planta integrada de 1 Mtpa, reflejando una operación moderna, eficiente y con niveles de automatización actuales, se adoptan los siguientes factores:

- **Factor Directo O&M: 0.15 FTE / ktpa Urea**

- *Justificación:* Valor representativo del personal permanente para operación integrada y mantenimiento rutinario, consistente con análisis detallados para plantas modernas de esta escala. Alto potencial localizable.
- **Factor Indirecto O&M: 0.10 FTE / ktpa Urea**
 - *Justificación:* Empleo en servicios de soporte, mantenimiento mayor, catalizadores, etc. Proporción D/I (~60%/40%) consistente con O&M de procesos químicos complejos.
- **Factor TOTAL O&M: 0.25 FTE / ktpa Urea**

Factores de Empleo O&M Adoptados para Síntesis de Urea (Integrada, Ref: 1 Mtpa)

Tipo Empleo	Factor Adoptado (FTE / ktpa Urea)
Directo	0.15
Indirecto	0.1
TOTAL	0.25

Consideraciones de Escala:

Los factores aquí presentados, basados en la referencia de 1 Mtpa, se aplicarán como base a las plantas específicas de los escenarios (1 x ~1.2 Mtpa en S1; 2 x ~0.6 Mtpa en S2). **Conclusión para Síntesis de Urea (1 Mtpa):**

Los factores adoptados para la producción integrada de Urea (**CAPEX Total 6.85 Pers-Año/ktpa y O&M Total 0.25 FTE/ktpa**), se basan en análisis específicos y benchmarks de la industria, alineándose con los criterios metodológicos de eficiencia y prudencia del estudio y asegurando coherencia interna con los resultados globales.

Esta sección aborda los factores de empleo para las plantas de producción de Urea. Se considera una **planta integrada** que incluye la síntesis previa de e-Amoníaco (vía Haber-Bosch con H₂V) y su posterior reacción con CO₂ biogénico para producir Urea sólida (granulada). Se toma como referencia una planta con capacidad nominal de **1 Mtpa (1000 ktpa) de Urea final**.

La estimación de factores se basa en la revisión de benchmarks de la industria de fertilizantes (ej., reportes de IFA - International Fertilizer Association, Ammonia Energy Association), datos de ingeniería de procesos químicos y estudios sobre Power-to-X. Los valores adoptados se seleccionan dentro de los **rangos referenciales**, buscando reflejar un balance entre la complejidad de estas plantas integradas y la aplicación de tecnologías modernas y eficientes, conforme a la nota metodológica general del capítulo.

Factores Adoptados para CAPEX (Construcción e Instalación):

Para la fase de construcción de una planta integrada Amoníaco-Urea de 1 Mtpa, se adoptan los siguientes factores específicos (por ktpa de Urea final), seleccionados dentro de los rangos para representar una instalación eficiente:

- **Factor Directo CAPEX: 1.2 Personas-Año / ktpa Urea**

- *Justificación:* Seleccionado dentro del rango referencial (1.0-1.5). Cubre las actividades directas de EPC para ambas secciones (Amoníaco y Urea), incluyendo obra civil, montaje de equipos complejos (reactores, convertidores, compresores, granuladores), tuberías de alta presión, electricidad/instrumentación y comisionado. Representa el empleo directo localizable en la construcción.
- **Factor Indirecto CAPEX: 2.3 Personas-Año / ktpa Urea**
 - *Justificación:* Seleccionado dentro del rango referencial (2.0-3.0). Incluye ingeniería especializada (procesos Haber-Bosch y síntesis de urea), fabricación/suministro de equipos críticos y de aleaciones especiales, catalizadores, licencias tecnológicas y logística asociada. Refleja la alta complejidad y dependencia de suministros globales.
- **Factor TOTAL CAPEX: 3.5 Personas-Año / ktpa Urea** *(Nota ilustrativa: Una planta de 1000 ktpa (1 Mtpa) generaría, con estos factores, 3,500 Personas-Año totales durante su construcción)*

Factores Adoptados para O&M (Operación y Mantenimiento):

Para la operación continua de una planta integrada de 1 Mtpa, se adoptan los siguientes factores (por ktpa de Urea final), seleccionados dentro de los rangos y considerando una operación moderna y optimizada:

- **Factor Directo O&M: 0.040 FTE / ktpa Urea**
 - *Justificación:* Seleccionado dentro del rango referencial (0.03-0.05). Personal permanente para operación de ambas secciones (NH₃ y Urea), incluyendo operadores de sala de control y campo, técnicos de mantenimiento (mecánico, eléctrico, I&C), personal de laboratorio, logística interna (manejo de producto) y gestión del sitio. Se asume un grado significativo de automatización acorde a plantas nuevas. Alto potencial localizable.
- **Factor Indirecto O&M: 0.025 FTE / ktpa Urea**
 - *Justificación:* Seleccionado dentro del rango referencial (0.02-0.03). Empleo en servicios de soporte recurrente (mantenimiento mayor especializado, gestión de catalizadores y consumibles), análisis externos, soporte técnico de licenciantes/proveedores, y parte de la administración corporativa indirecta.
- **Factor TOTAL O&M: 0.065 FTE / ktpa Urea** *(Nota ilustrativa: Una planta de 1000 ktpa (1 Mtpa) generaría, con estos factores, 65 FTE totales durante su operación)*

Consideraciones de Escala:

Los factores aquí presentados corresponden a una planta de referencia de 1 Mtpa. Al aplicar estos factores a las plantas específicas de los escenarios (1 x ~1.2 Mtpa en S1; 2 x ~0.6 Mtpa en S2) en los cálculos del Capítulo X, se debe tener presente la posible influencia de las **economías/deseconomías de escala**.

Conclusión para Síntesis de Urea (1 Mtpa):

Los factores adoptados para la producción integrada de Urea (**CAPEX Total 3.5 Pers-Año/ktpa** y **O&M Total 0.065 FTE/ktpa**) se seleccionaron dentro de los rangos referenciales, alineándose con los criterios metodológicos generales de prudencia y eficiencia para instalaciones modernas. Estos factores base se utilizarán para estimar el empleo asociado a la producción de urea.

Tabla A8: Estimación Empleo Construcción - Síntesis de Urea.

Categoría	Estimación (Rango)	Supuestos Clave
Mano de Obra Directa		
Pico de Trabajadores	1,000 - 1,500	Comparación con proyectos NH3/Urea/MeOH >\$1B, alcance integrado
Promedio de Trabajadores	600 - 900	Estimación basada en perfil típico de construcción
Años-Hombre Directos (Total)	1,800 - 2,700	Promedio * 3 años de duración
Mano de Obra Indirecta		
<i>Años-Hombre Indirectos (Total)</i>	<i>1,600 - 2,400</i>	<i>Multiplicador de Proveedores ~0.9 (basado en 94) aplicado a directos</i>
Mano de Obra Inducida		
<i>Años-Hombre Inducidos (Total)</i>	<i>2,500 - 3,800</i>	<i>Multiplicador Inducido ~1.4 (basado en 94) aplicado a directos</i>
Impacto Total		
Años-Hombre Totales (Suma)	5,900 - 8,900	Suma de Directos + Indirectos + Inducidos
Multiplicador Total Implícito	3.3 - 3.3	(Indirectos + Inducidos) / Directos + 1

Tabla A9: Estimación Empleo O&M - Síntesis de Urea.

Categoría	Estimación Anual (Rango FTEs)	Supuestos Clave
Mano de Obra Directa		
Operaciones (incl. Laboratorio)	50 - 90	~40-50% del total directo, cobertura 24/7
Mantenimiento (Técnicos, Planif., Sup.)	40 - 70	~30-40% del total directo, mix de especialidades
Soporte Técnico y Admin./HSE	20 - 40	~10-20% del total directo
Total Directo FTEs	120 - 180	Suma de las categorías; benchmarking 36
Mano de Obra Indirecta	300 - 700	Multiplicador de Proveedores ~2.5-4.0 aplicado a directos
Mano de Obra Inducida	300 - 450	Multiplicador Inducido ~1.7-2.5 aplicado a directos
Total Empleos Soportados (Anual)	720 - 1,330	Suma de Directos + Indirectos + Inducidos
Multiplicador Total Implícito	6.0 - 7.4	(Indirectos + Inducidos) / Directos + 1

Factores de Empleo - Síntesis de e-SAF (vía MtJ - Ref: 500 ktpa)

Esta sección presenta los factores de empleo estimados para la planta de producción de Combustible Sostenible de Aviación (e-SAF). La tecnología de referencia asumida es la ruta **Metanol-a-Jet (MtJ)** y una capacidad nominal de **500 ktpa de e-SAF final**, correspondiente a la planta única ubicada en la Zona Metropolitana.

Los factores se estiman a partir de la revisión de literatura sobre procesos Power-to-Liquids (PtL), datos de ingeniería conceptual para MtJ y procesos de refino asociados, y benchmarks adaptados (e.g., IRENA PtX/PtL reports, NREL, IEA, studies on SAF routes, refinery data). La selección de valores, aplicando los criterios metodológicos generales de **prudencia y eficiencia** para instalaciones modernas y complejas (ver Nota Metodológica al inicio del capítulo).

Es fundamental aclarar que los factores aquí presentados cubren exclusivamente el **empleo Directo e Indirecto**, conforme al alcance definido en el Capítulo IV, y no incluyen el empleo inducido. Las unidades de medida son Personas-Año/ktpa para CAPEX y FTE/ktpa para O&M. Estos factores engloban las principales etapas del proceso dentro de límites de batería (ISBL), incluyendo: recepción/almacenamiento de e-metanol, unidad de síntesis MtJ, unidades de acabado (hidroprocesamiento/fraccionamiento), almacenamiento de producto y sistemas auxiliares principales.

Factores Adoptados para CAPEX (Construcción e Instalación):

Para la fase de construcción de una planta de e-SAF (MtJ) de 500 ktpa, se adoptan los siguientes factores específicos (por ktpa de e-SAF), seleccionados dentro de los rangos referenciales para reflejar la complejidad del proceso bajo supuestos de eficiencia constructiva:

- **Factor Directo CAPEX: 6.0 Personas-Año / ktpa e-SAF**
 - *Justificación:* Seleccionado del rango referencial [5.0-7.5] (ver Tabla V.7-1). Cubre las actividades directas de EPC (obra civil, montaje mecánico de equipos complejos, tuberías, E&I, comisionado). Refleja la significativa intensidad laboral directa de este tipo de planta química/refino.
- **Factor Indirecto CAPEX: 12.0 Personas-Año / ktpa e-SAF**
 - *Justificación:* Seleccionado del rango referencial [10.0-15.0]. Incluye ingeniería especializada, fabricación/suministro de equipos críticos, catalizadores, sistemas de control avanzados y logística. Alta dependencia tecnológica y de suministros externos.
- **Factor TOTAL CAPEX: 18.0 Personas-Año / ktpa e-SAF** *(Nota ilustrativa: Una planta de 500 ktpa generaría 9,000 Personas-Año totales (D+I) durante su construcción)*

Rangos Referenciales Factores Empleo CAPEX para e-SAF (MtJ)

Tipo Empleo	Factor Rango (Personas-Año / ktpa e-SAF)
Directo	5.0 - 7.5
Indirecto	10.0 - 15.0
TOTAL	15.0 - 22.5

Factores Adoptados para O&M (Operación y Mantenimiento):

Para la operación continua de la planta de e-SAF de 500 ktpa, se adoptan los siguientes factores (por ktpa de e-SAF), seleccionados de los rangos referenciales y asumiendo una operación eficiente y moderna:

- **Factor Directo O&M: 0.20 FTE / ktpa e-SAF**
 - *Justificación:* Seleccionado del rango referencial [0.15-0.25]. Personal permanente para operación de procesos complejos, mantenimiento, control de calidad estricto (ASTM), logística interna y gestión del sitio.
- **Factor Indirecto O&M: 0.10 FTE / ktpa e-SAF**
 - *Justificación:* Seleccionado del rango referencial [0.08-0.12] . Empleo en servicios de soporte (mantenimiento especializado, catalizadores), análisis externos, certificaciones, administración corporativa indirecta.
- **Factor TOTAL O&M: 0.30 FTE / ktpa e-SAF** (*Nota ilustrativa: Una planta de 500 ktpa generaría 150 FTE totales (D+I) durante su operación*)

Rangos Referenciales Factores Empleo O&M para e-SAF (MtJ)

Tipo Empleo	Factor Rango (FTE / ktpa e-SAF)
Directo	0.15 - 0.25
Indirecto	0.08 - 0.12
TOTAL	0.23 - 0.37

Conclusión para Síntesis de e-SAF (500 ktpa):

Los factores adoptados para la producción de e-SAF vía MtJ (**CAPEX Total 18.0 Pers-Año/ktpa** y **O&M Total 0.30 FTE/ktpa**) se seleccionaron dentro de los rangos referenciales identificados (Tablas V.7-1 y V.7-2), reflejando la complejidad del proceso, pero aplicando criterios de eficiencia y prudencia metodológica. Estos factores (cubriendo empleo directo e indirecto) se utilizarán para estimar el impacto laboral de la planta de e-SAF.

Tabla A10: Estimación Mano de Obra e Impacto Construcción - Planta e-SAF.

Métrica	Estimación (Rango)	Unidad	Notas / Fuentes de Referencia
Pico de Mano de Obra Directa	600 - 1.000	Trabajadores	Basado en benchmarks de proyectos industriales similares
Promedio Anual de Mano de Obra Directa	915 - 1.830	FTEs	Calculado a partir de años-trabajo directos totales / 3 años
Total Años-Trabajo Directos	2.750 -	Años-	Basado en 5-10 años-trabajo/\$M CAPEX y CAPEX estimado

	5.500	Trabajo	de \$550M 100
Total Años-Trabajo Indirectos (Construcción)	<i>Variable</i>	Años-Trabajo	Dependiente de la desagregación del CAPEX y multiplicadores específicos de la cadena de suministro
Total Años-Trabajo Inducidos (Construcción)	<i>Variable</i>	Años-Trabajo	Dependiente de salarios, residencia de trabajadores y multiplicadores de gasto
Total Años-Trabajo (Relacionados con Construcción)	6.875 - 13.750	Años-Trabajo	Suma de directos + indirectos/inducidos asociados a actividad constructiva (usando multiplicador total 2.5) 122
Total Horas-Hombre Directas Estimadas	5.5 - 11	Millones	Basado en años-trabajo directos (asumiendo 2000 h/año-trabajo)

Tabla A11: Estimación Mano de Obra e Impacto O&M - Planta e-SAF.

Métrica	Estimación	Unidad	Notas / Fuentes de Referencia
Empleos Directos Totales	150 - 250	FTEs	Basado en benchmarks de capacidad y complejidad
Distribución Estimada (Operaciones / Mantenimiento & Soporte)	60% / 40%	% de FTEs Directos	Estimación basada en prácticas industriales; sujeto a estrategia de externalización
Empleos Indirectos Anuales	<i>Variable</i>	Empleos	Dependiente de la cadena de suministro específica y multiplicadores
Empleos Inducidos Anuales	<i>Variable</i>	Empleos	Dependiente de salarios, patrones de gasto local y multiplicadores
Total Empleos Anuales Sostenidos (Directo+Indirecto+Inducido)	750 - 1.750	Empleos	Basado en FTEs directos y multiplicador total 5.0-7.0

Ductos de H2

Esta sección detalla los factores de empleo para la construcción (CAPEX) y O&M de **ductos de alta presión para H2**. Dada la limitada información pública específica para ductos de H2 a la escala requerida, y siguiendo un enfoque conservador, se adoptan como proxy los factores derivados de análisis detallados para **gasoductos de gas natural (GN)** de características similares (longitud, presión ANSI 600), asumiendo que la intensidad laboral no sería inferior. Los valores seleccionados corresponden a la **estimación más conservadora (baja)** identificada en dichos análisis específicos, alineándose con la Nota Metodológica general del capítulo. Los factores se presentan por kilómetro (km).

Factores Adoptados para CAPEX (Construcción e Instalación):

Seleccionando el valor más conservador (mínimo) del rango [4.0-9.0 Pers-Año/km] identificado en análisis detallados para empleo directo en gasoductos, se adoptan los siguientes factores:

- **Factor Directo CAPEX: 4.0 Personas-Año / km**
 - *Justificación:* Estimación conservadora (baja) del empleo directo en EPC por km, basada en análisis específicos de gasoductos. Cubre ingeniería, permisos, ROW, zanja, tubería, soldadura, pruebas, estaciones de compresión.
- **Factor Indirecto CAPEX: 7.43 Personas-Año / km**
 - *Justificación:* Derivado manteniendo proporción D/I (~35%/65%) representativa de la dependencia de suministros (tuberías, compresores) y servicios externos.
- **Factor TOTAL CAPEX: 11.43 Personas-Año / km**

Factores de Empleo CAPEX Adoptados para Ductos H2

Tipo Empleo	Factor Adoptado (Personas-Año / km)
Directo	4
Indirecto	7.43
TOTAL	11.43

Factores Adoptados para O&M (Operación y Mantenimiento):

Seleccionando el valor más conservador (mínimo) del rango [0.07-0.12 FTE/km] identificado en análisis detallados para empleo directo, se adoptan los siguientes factores:

- **Factor Directo O&M: 0.07 FTE / km**
 - *Justificación:* Estimación conservadora (baja) del personal permanente directo para O&M por km (incl. monitoreo, mantenimiento ROW, operación/manto. estaciones), basada en análisis específicos de gasoductos.
- **Factor Indirecto O&M: 0.047 FTE / km**
 - *Justificación:* Derivado manteniendo proporción D/I (~60%/40%) consistente con O&M de ductos. Cubre servicios especializados, repuestos, etc.

- **Factor TOTAL O&M: 0.117 FTE / km**

Factores de Empleo O&M Adoptados (Conservadores) para Ductos H2

Tipo Empleo	Factor Adoptado (FTE / km)
Directo	0.07
Indirecto	47
TOTAL	117

Conclusión para Ductos H2: Los factores conservadores adoptados, basados en un proxy de gas natural, se aplicarán a las longitudes de ductos de H2 definidas en S1 y, potencialmente, en S2.

Ductos de CO2

Esta sección presenta los factores para **ductos de transporte de CO2 en fase densa**. Los factores se derivan de **análisis detallados específicos para ductos de CO2 de esta escala y configuración**, seleccionando los **valores más conservadores (mínimos)** identificados en dichos análisis, conforme a la Nota Metodológica general. Se presentan por **kilómetro (km)**.

Factores Adoptados para CAPEX (Construcción e Instalación):

Seleccionando el valor más conservador (mínimo) del rango [20.0-30.0 Pers-Año/km] identificado para empleo directo en análisis específicos, se adoptan los siguientes factores:

- **Factor Directo CAPEX: 4.0 Personas-Año / km**
 - *Justificación:* Estimación conservadora (baja) de empleo directo EPC por km, basada en análisis específicos para ductos de CO2 denso. Es significativamente mayor que el proxy de GN, reflejando potencialmente mayor complejidad o diferentes benchmarks. Cubre ingeniería, permisos, tuberías (materiales específicos para CO2), instalación, pruebas, estaciones de bombeo/recalentamiento.
- **Factor Indirecto CAPEX: 37.14 Personas-Año / km**
 - *Justificación:* Derivado manteniendo proporción D/I (~35%/65%), reflejando dependencia de equipos especializados (bombas alta presión) y servicios externos.
- **Factor TOTAL CAPEX: 57.14 Personas-Año / km**

Factores de Empleo CAPEX Adoptados para Ductos CO2

Tipo Empleo	Factor Adoptado (Personas-Año / km)
Directo	4
Indirecto	7.43
TOTAL	11.43

Factores Adoptados para O&M (Operación y Mantenimiento):

Seleccionando el valor más conservador (mínimo) del rango [0.14-0.20 FTE/km] identificado para empleo directo en análisis específicos, se adoptan los siguientes factores:

- **Factor Directo O&M: 0.14 FTE / km**
 - *Justificación:* Estimación conservadora (baja) de personal permanente directo O&M por km, basada en análisis específicos. Incluye monitoreo (integridad, fugas CO₂), mantenimiento ROW, operación/manto. estaciones. Mayor que H₂/GN por complejidad/seguridad de CO₂ denso.
- **Factor Indirecto O&M: 0.093 FTE / km**
 - *Justificación:* Derivado manteniendo proporción D/I (~60%/40%). Cubre inspecciones especializadas (ILI para CO₂), mantenimiento especializado, etc.
- **Factor TOTAL O&M: 0.233 FTE / km**

Factores de Empleo O&M Adoptados (Conservadores) para Ductos CO₂

Tipo Empleo	Factor Adoptado (FTE / km)
Directo	0.14
Indirecto	93
TOTAL	233

Conclusión para Ductos CO₂: Los factores conservadores adoptados, basados en análisis específicos, se aplicarán a las redes de CO₂ (más extensas en S2).

Infraestructura Eléctrica (líneas de alta tensión y subestación de 500kV)

Esta sección cubre los factores para **líneas de transmisión (por km) y subestaciones (por SE)** de 500 kV. Los factores derivan de **análisis detallados específicos para este tipo de infraestructura eléctrica en el contexto uruguayo**, seleccionando los **valores más conservadores (mínimos)** identificados en dichos análisis, conforme a la Nota Metodológica general.

Factores Adoptados para CAPEX (Construcción e Instalación):

Seleccionando los valores más conservadores (mínimos) de los rangos identificados en análisis específicos (Línea: [4.0-5.0] Pers-Año/km; SE: [150-300] Pers-Año/SE), se adoptan los siguientes factores:

- **Línea AT (500kV):**
 - Factor Directo CAPEX: **4.0 Pers-Año / km**
 - Factor Indirecto CAPEX: **6.0 Pers-Año / km** (D/T ~40%)

- Factor TOTAL CAPEX: **10.0 Pers-Año / km**
- **Subestación AT (Ref: 500kV):**
 - Factor Directo CAPEX: **150 Personas-Año / SE**
 - Factor Indirecto CAPEX: **350 Personas-Año / SE** (D/T ~30%)
 - Factor TOTAL CAPEX: **500 Personas-Año / SE**
- *Justificación:* Valores conservadores (bajos) basados en análisis específicos, reflejando eficiencia en diseño, gestión de ROW, montaje de estructuras y equipamiento de SE para proyectos modernos a gran escala.

Factores CAPEX Adoptados para Línea AT 500kV

Tipo Empleo	Factor Adoptado (Personas-Año / km)
Directo	4
Indirecto	6
TOTAL	10

Factores CAPEX Adoptados (Conservadores) para Subestación AT 500kV

Tipo Empleo	Factor Adoptado (Personas-Año / SE)
Directo	150
Indirecto	350
TOTAL	500

Factores Adoptados para O&M (Operación y Mantenimiento):

Seleccionando los valores más conservadores (mínimos) de los rangos identificados (Línea: [0.05-0.15] FTE/km; SE: [2.0-5.0] FTE/SE), se adoptan los siguientes factores:

- **Línea AT (500kV):**
 - Factor Directo O&M: **0.05 FTE / km**
 - Factor Indirecto O&M: **0.05 FTE / km** (D/T ~50%)
 - Factor TOTAL O&M: **0.10 FTE / km**
- **Subestación AT (Ref: 500kV):**
 - Factor Directo O&M: **2.0 FTE / SE**
 - Factor Indirecto O&M: **1.33 FTE / SE** (D/T ~60%)
 - Factor TOTAL O&M: **3.33 FTE / SE**
- *Justificación:* Valores conservadores (bajos) basados en análisis específicos, asumiendo prácticas de O&M eficientes (inspección basada en condición, mantenimiento predictivo, gestión optimizada de vegetación).

Factores O&M Adoptados (Conservadores) para Línea AT 500kV

Tipo Empleo	Factor Adoptado (FTE / km)
Directo	0.05
Indirecto	0.05

TOTAL	0.1
-------	-----

Factores O&M Adoptados (Conservadores) para Subestación AT 500kV

Tipo Empleo	Factor Adoptado (FTE / SE)
Directo	2
Indirecto	1.33
TOTAL	3.33

Conclusión para Infraestructura Eléctrica: Los factores conservadores adoptados, basados en análisis específicos, se aplicarán a la infraestructura eléctrica nueva requerida, siendo previsible una mayor necesidad total en S2 por su naturaleza distribuida.

Anexo 2. Hoja de Ruta para el Desarrollo del Capital Humano: Prioridades por Fases

Para traducir estas recomendaciones en un plan de acción concreto y secuencial, proponemos alinear los esfuerzos con las fases establecidas en la "Hoja de Ruta del H2 verde en Uruguay". Este enfoque por fases permitirá una implementación gradual y adaptativa, asegurando que las capacidades se desarrollen en sintonía con las necesidades de la industria en cada etapa de su maduración.

Fase 1: Bases y Pilotaje (hasta 2025)

En esta fase inicial, el objetivo es construir los cimientos institucionales y formativos que habilitarán el despegue de la industria. Las acciones deben ser rápidas y focalizadas en los aspectos más urgentes.

- Acción 1.1 (Gobernanza): Puesta en marcha oficial de la Mesa Interinstitucional de Empleo y Formación y del Observatorio de Prospectiva Laboral, con asignación de presupuesto y equipo técnico inicial. Su primera tarea será validar la primera versión de los perfiles ocupacionales y brechas formativas.
- Acción 1.2 (Formación Urgente - HSE y Normativa): Diseño y lanzamiento de los primeros cursos de formación intensiva en Seguridad (HSE), basados en el reglamento de URSEA, dirigidos a los profesionales y técnicos que participarán en los primeros proyectos. Paralelamente, iniciar la formación de especialistas en normativas de exportación (RFNBO/CBAM).
- Acción 1.3 (Capacidades Básicas): Lanzamiento de las primeras microcredenciales a través de INEFOP para los oficios de mayor demanda inicial (ej. soldadura especializada, montaje de estructuras para energías renovables).
- Acción 1.4 (Sensibilización): Inicio del Programa Nacional de Sensibilización y Orientación Profesional, con foco en ferias vocacionales y charlas en centros de Educación Media para el ciclo lectivo 2025.

Fase 2: Escalamiento y Consolidación (2026-2030)

Con los primeros proyectos en construcción y operación, esta fase se centra en escalar la oferta formativa y desarrollar el ecosistema local.

- Acción 2.1 (Infraestructura Formativa): Puesta en funcionamiento de los primeros Centros Regionales de Formación de Excelencia en las zonas identificadas como hubs industriales, equipados con laboratorios y simuladores.
- Acción 2.2 (Formación Dual y Alianzas): Implementación a escala de los programas de formación dual financiados por INEFOP, estableciendo convenios formales entre las empresas inversoras y los centros de UTU/UTEC, con el asesoramiento de AUDER y AUH2.
- Acción 2.3 (Ecosistema Local): Lanzamiento y ejecución plena del Programa de Desarrollo de Proveedores Locales en asociación con ANDE, conectando a las PYMES capacitadas con las oportunidades de negocio de los grandes proyectos.
- Acción 2.4 (Equidad de Género): Ejecución y monitoreo del plan de acción de género, evaluando el cumplimiento de las metas de participación femenina en la formación y la contratación. Fortalecimiento de las actividades de la red liderada por AUME.

Fase 3: Madurez y Sofisticación (2030 en adelante)

Con una industria ya establecida, el foco se desplaza hacia la innovación, la optimización y la formación de alta especialización.

- Acción 3.1 (Formación Avanzada): Consolidación de los programas de posgrado en las universidades, como el de "Gestión Integrada de Agua y Energía", y creación de nuevas especializaciones basadas en las necesidades detectadas por el Observatorio.
- Acción 3.2 (I+D+i): Pleno funcionamiento del Fondo Sectorial H₂V, financiando proyectos de investigación que no solo apunten a la optimización de procesos, sino también al desarrollo de la siguiente generación de tecnologías de hidrógeno.
- Acción 3.3 (Certificación Continua): El Sistema Nacional de Microcredenciales y Certificaciones opera de manera continua, ofreciendo programas de recertificación y actualización para mantener a la fuerza laboral a la vanguardia del conocimiento tecnológico y normativo.

Este cronograma, si bien ambicioso, establece un camino claro y lógico para asegurar que el desarrollo del capital humano en Uruguay avance al mismo ritmo que el desarrollo de su prometedora industria de hidrógeno verde.