



# Evaluación del potencial de uso de Hidrógeno Verde y sus derivados en el sector industrial en Uruguay

## Resumen ejecutivo

En asociación con:



Estudio en el marco de la Iniciativa Facilidad de Desarrollo en Transición con el apoyo de la cooperación de la Unión Europea



Uruguay  
Presidencia



**auci**  
AGENCIA URUGUAYA  
DE COOPERACIÓN  
INTERNACIONAL



Iniciativa Facilidad de Desarrollo en Transición

Créditos:

MIEM

AUCI

UE

Consultora: GME en asociación con PLAPIQUI

Junio 2024



# Tabla de Contenidos

<b>1 RESUMEN EJECUTIVO, PRINCIPALES HALLAZGOS Y CONCLUSIONES .....</b>	<b>3</b>
<b>1.1 APLICACIONES NO ENERGÉTICAS DEL HIDRÓGENO Y SUS DERIVADOS .</b>	<b>3</b>
1.1.1 Usos no energéticos del hidrógeno .....	4
1.1.2 Usos no energéticos del metanol .....	4
1.1.3 Usos no energéticos del amoníaco .....	5
<b>1.2 USOS MÁS PROMETEDORES PARA URUGUAY .....</b>	<b>6</b>
<b>1.3 DESCRIPCIÓN DE LOS CASOS CANDIDATOS .....</b>	<b>7</b>
1.3.1 Peróxido de hidrógeno .....	7
1.3.2 Formaldehído / Concentrado Urea-Formaldehído (UFC) / Resinas Urea-Formaldehído (R-UF) .....	9
1.3.3 Metil aminas (aminas alifáticas) .....	11
1.3.4 Melamina .....	12
1.3.5 Polioximetileno (POM) .....	14
<b>1.4 CASOS DE ESTUDIO .....</b>	<b>15</b>
1.4.1 Formaldehído para resinas.....	15
1.4.2 Melamina .....	17
<b>1.5 DIMENSIONAMIENTO DE LA PLANTA Y COSTOS PRINCIPALES .....</b>	<b>19</b>
1.5.1 Formaldehído para resinas.....	19
1.5.2 Melamina .....	23
<b>1.6 EMISIONES DE CO<sub>2</sub> .....</b>	<b>25</b>
1.6.1 Formaldehído para resinas.....	25
1.6.2 Melamina .....	26
<b>1.7 ANÁLISIS ECONÓMICO .....</b>	<b>27</b>
1.7.1 Formaldehído para resinas.....	27
1.7.2 Melamina .....	29
<b>1.8 OPORTUNIDADES Y BARRERAS.....</b>	<b>30</b>
<b>1.9 RECOMENDACIONES DE POLÍTICAS PÚBLICAS .....</b>	<b>33</b>

# 1 Resumen ejecutivo, principales hallazgos y conclusiones

La presente consultoría se enmarca en la Iniciativa Facilidad de Desarrollo en Transición del Fondo Bilateral AUCI (Agencia Uruguaya de Cooperación Internacional)-UE (Unión Europea). Se desarrolla con el aporte y apoyo de la cooperación de la Unión Europea a la Hoja de Ruta de Hidrógeno Verde y derivados, impulsada por el gobierno nacional de Uruguay.

El estudio tiene como objetivo general evaluar la viabilidad del uso del Hidrógeno Verde y sus derivados como insumo no energético en el sector industrial de Uruguay, que contribuya a la identificación de alternativas para la descarbonización de la economía local; así como el potencial de desarrollo de nuevos sectores que puedan verse traccionados por la industria del Hidrógeno Verde y sus derivados.

Quedan excluidos del alcance del estudio aquellos usos ya estudiados en la Hoja de Ruta de Hidrógeno verde en Uruguay, que incluye la utilización como agente reductor en la industria del hierro y la producción de amoníaco para fertilizantes.

## 1.1 Aplicaciones no energéticas del hidrógeno y sus derivados

- **Hidrógeno verde y transición energética.** El hidrógeno verde está ganando reconocimiento global como una alternativa para reducir las emisiones, especialmente en sectores donde esto resulta particularmente desafiante.
- **Usos principales a nivel global.** Como materia prima para la industria: en la refinación de petróleo (hidrodesulfuración, hidrocracking) y en la síntesis de amoníaco (mayoritariamente para su uso como fertilizante). También se emplea el hidrógeno en mezcla con otros gases como materia prima en la síntesis de metanol, producción de acero y como fuente de energía para diversos procesos industriales. En conjunto, estos usos representan cerca del 90% del consumo actual de hidrógeno.
- A futuro se avizora un escalado del uso del hidrógeno y sus derivados como **combustible** para transporte pesado, aviación y marítimo principalmente.
- Varias de estas aplicaciones **ya están planteadas** en la **hoja de ruta del hidrógeno verde en Uruguay**<sup>1</sup>, tanto para uso doméstico como para exportación y con distintos

---

<sup>1</sup> [https://www.gub.uy/ministerio-industria-energia-mineria/sites/ministerio-industria-energia-mineria/files/documentos/noticias/H2\\_final.pdf](https://www.gub.uy/ministerio-industria-energia-mineria/sites/ministerio-industria-energia-mineria/files/documentos/noticias/H2_final.pdf)

horizontes de tiempo.

- Por fuera de estos usos, se encuentran **otras aplicaciones directas del hidrógeno y sus productos intermedios (amoníaco, metanol) como recurso no energético** que constituyen el foco de este estudio.

### 1.1.1 Usos no energéticos del hidrógeno

Entre ellos se puede mencionar el uso del hidrógeno en la **industria alimenticia**, en la **industria de fabricación de vidrio**, en la **industria de la química fina y farmacéutica**, y en la **síntesis de diversos productos químicos**; además de algunas aplicaciones del amoníaco y del metanol (con fines no energéticos ni como fertilizantes).

- **Industria alimenticia:** el  $H_2$  se utiliza para producir grasas saturadas en la fabricación de alimentos procesados, como margarina y manteca vegetal, con el objeto de aumentar el punto de fusión y lograr mayor resistencia a la oxidación.
- **Industria del vidrio:** el hidrógeno se introduce en el horno para crear una atmósfera reductora que previene la oxidación y la formación de impurezas en el vidrio fundido que provocan imperfecciones. Para evitar procesos de oxidación se utiliza una atmósfera protectora que suele estar compuesta por un 90 % de nitrógeno y un 10 % por ciento de hidrógeno. El hidrógeno también se puede utilizar como un medio para controlar la temperatura durante el proceso de fabricación.
- **Síntesis de productos químicos:** si bien se ha destacado que el amoníaco y el metanol son los principales productos químicos derivados del hidrógeno, existe una diversidad adicional de productos químicos que requieren del hidrógeno en su proceso de síntesis.
- **Química fina o de especialidades:** se enfoca en la producción de compuestos químicos de alta pureza y alto valor agregado, con aplicaciones farmacéutica, agroquímica, electrónica, cosmética, entre otros. El hidrógeno es fundamental en la química fina debido a su capacidad para participar en reacciones de hidrogenación selectiva, actuar como agente reductor en procesos catalíticos y en reacciones de hidrólisis.

### 1.1.2 Usos no energéticos del metanol

Aproximadamente el 70 % del metanol se utiliza como materia prima para la producción de **otros productos químicos** y el 30% restante se utiliza como **combustible**.

Los sectores que demandan el uso de metanol son los de construcción, automoción, electrónica, embalaje, revestimientos, pinturas, productos farmacéuticos, cosméticos, electrodomésticos y disolventes.

A continuación, se presentan los principales productos que son sintetizados a partir del metanol:

- El **formaldehído** es uno de los productos químicos más importantes a nivel mundial, debido a que es una materia prima necesaria para muchas industrias, incluidas las de polímeros, resinas, pinturas y adhesivos. Los productos más relevantes producidos a partir del formaldehído son las **resinas industriales** como melamina-formaldehído,

urea-formaldehído y fenol-formaldehído.

- El **ácido acético** es un compuesto químico ampliamente utilizado en diversos procesos industriales. Los derivados del ácido acético se pueden utilizar en adhesivos, resinas de emulsión de látex para pinturas, agentes de acabado textil, revestimientos de papel, estopas de filtro de cigarrillos de plástico celulósico y fibras de acetato de celulosa.
- El proceso de metanol a **hidrocarburos** (MTH) es una tecnología clave en la industria química que engloba los procesos de metanol a gasolina (MTG), metanol a olefinas (MTO) y metanol a aromáticos (MTA). Este proceso permite producir productos petroquímicos básicos a partir de metanol (en sus diferentes orígenes).
- El **dimetil éter** (DME) ultrapuro se utiliza comúnmente como propelente de aerosol. También se utiliza en la industria cosmética, en la producción de sulfato de dimetilo, en la producción de ácido acético o anhídrido acético a través de acetato de metilo, para producir refrigerante R723 y también es usado para la producción de espumas de poliuretano y de espuma de poliestireno.
- El **metacrilato de metilo** (MMA) es la materia prima para la producción de polimetil metacrilato (PMMA, Plexiglás), un polímero altamente transparente y brillante. Además, el MMA encuentra aplicación en la producción de aditivos para aceites (por ejemplo, Viscoflex), recubrimientos de películas en preparaciones farmacéuticas (Eudragit) y productos dentales. Además, el MMA se utiliza como humectante y espesante para pinturas de emulsión.
- Las **metilaminas** se producen a través de la reacción del metanol y el amoníaco, la dimetilamina es el producto más importante, ya que es esencial para la síntesis de formamida N, N-dimetílica (DMF). Le sigue en importancia la monometilamina, utilizada en la fabricación de urea de metilo, N-metil-pirrolidona (NMP) y taurina de metilo, esta última empleada en la captura de CO<sub>2</sub> y como ingrediente en agentes de lavado. La trimetilamina, por su parte, se utiliza en la síntesis de cloruro de colina. Las tres metilaminas son intermediarias vitales en la producción de solventes, insecticidas, herbicidas, productos farmacéuticos y detergentes.

### 1.1.3 Usos no energéticos del amoníaco

Alrededor del 85% del NH<sub>3</sub> mundial es utilizado en la producción de **fertilizantes** nitrogenados (urea, UAN, nitrato, sulfato y fosfatos de amonio). La fracción remanente (15%) es explicada por una variedad de otras aplicaciones del NH<sub>3</sub> que se presentan a continuación:

- Las **aminas** son compuestos orgánicos derivados del amoníaco. Tienen una amplia gama de aplicaciones en la industria, la medicina y la síntesis de compuestos orgánicos. En la fabricación de productos químicos agrícolas, disolventes, polímeros, aditivos para piensos y alimentos, productos de limpieza, productos farmacéuticos, tratamiento de aguas y gases, productos de cuidado personal, cemento, pinturas y revestimientos, textiles, etc.
- La **melamina** (C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>N<sub>6</sub>) es un compuesto orgánico que se utiliza ampliamente en la industria para fabricar resinas de melamina-formaldehído. La melamina se obtiene a

partir de urea y amoníaco.

- El **ácido nítrico** ( $\text{HNO}_3$ ) es un ácido fuerte, en estado líquido en condiciones atmosféricas. Es corrosivo y reacciona con casi todos los metales, excepto con los metales nobles y algunas aleaciones. Reacciona violentamente con muchos compuestos orgánicos. Es miscible con agua. En la actualidad, el ácido nítrico es uno de los 15 commodities más importantes a nivel global. Un 80% del ácido nítrico producido es usado en la producción de fertilizantes nitrogenados mientras que el 20% restante es destinado a la producción de diferentes compuestos químicos, tales como explosivos o intermediarios para la producción de polímeros.
- A partir del amoníaco se puede producir también una variedad de **polímeros**, por ejemplo, acrilonitrilo, poliamidas y poliuretanos
- El **ácido cianhídrico** ( $\text{HCN}$ ) es un producto químico esencial para la producción de adiponitrilo (para producción de nylon), ésteres metacrílicos (para producción de metilmetacrilato), cianuros de sodio/potasio (usados en minería) y algunos aminoácidos técnicamente importantes.

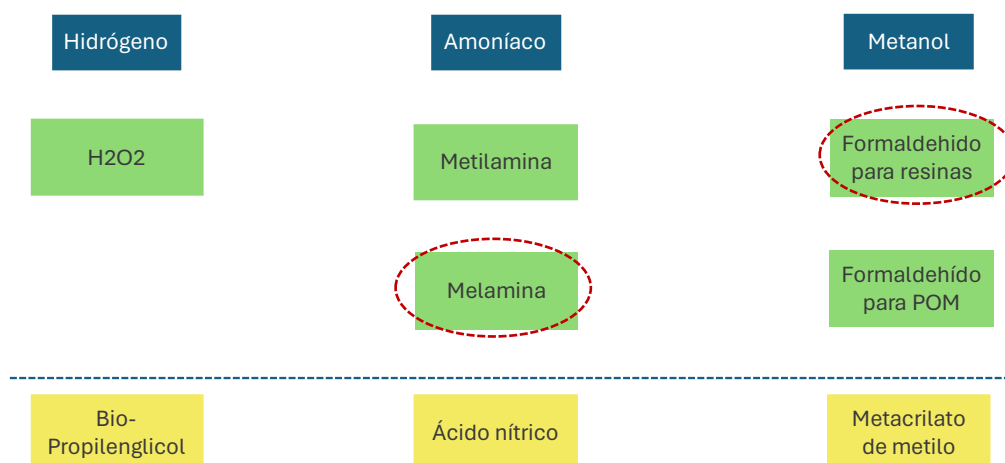
## 1.2 Usos más prometedores para Uruguay

Del conjunto total de precursores relevados se elaboró un conjunto de criterios para seleccionar un submenú de candidatos con mayor potencial de desarrollo. Estos criterios fueron:

- Materias primas necesarias para su producción, considerando su disponibilidad en Uruguay.
- Requerimientos (o no) de insumos fósiles.
- Si el producto final es un commodity o se trata de un producto con mayor valor agregado
- Nivel de madurez de la tecnología de producción.
- Restricciones debido a toxicidad o peligrosidad del producto final.
- Demanda a nivel global y doméstico, rutas al mercado.
- Usos finales y aplicaciones.

Basados en los criterios mencionados, se seleccionaron 5 casos como los más prometedores para su desarrollo en Uruguay (ver Figura 1).

**Figura 1 Usos más prometedores para Uruguay: casos seleccionados**



Fuente: Elaboración propia.

## 1.3 Descripción de los casos candidatos

### 1.3.1 Peróxido de hidrógeno

#### 1.3.1.1 Producción actual y proyección a nivel global

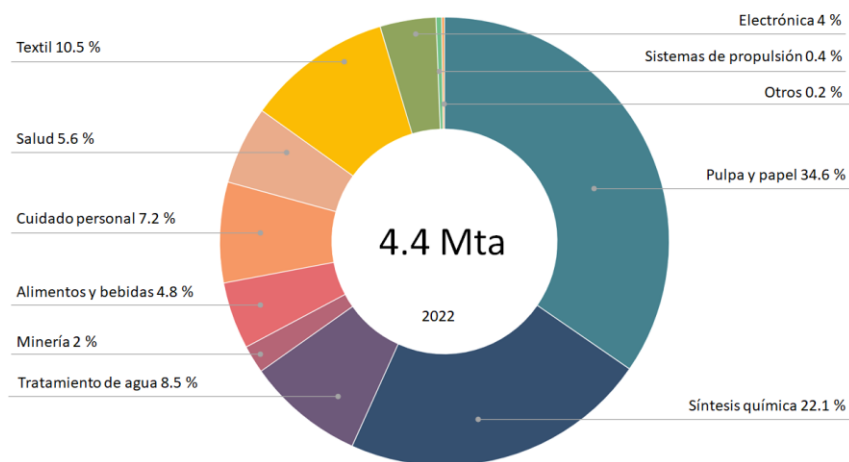
En 2022, la capacidad de producción global alcanzó los 4.4 Mton. Se estiman producciones anuales de alrededor de 7 Mton para el 2030. El H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> se comercializa comúnmente en solución acuosa en un amplio rango de concentraciones (3-35 %wt) para ser empleado en sus diferentes aplicaciones.

#### 1.3.1.2 Usos

El H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> es un poderoso oxidante y tiene una gran diversidad de usos, entre ellos como agente oxidante propiamente dicho, agente para blanqueo (telas, algodón, madera, pulpa de papel e industria alimenticia (blanqueo de quesos, pollos, carnes, etc)), como componente de combustibles para cohetes, para elaboración de sustancias químicas orgánicas como el óxido de propileno, como agente antiséptico y antibacteriano, en la industria electrónica (semiconductores y componentes), en el tratamiento de aguas residuales, etc. La Figura 2 muestra los principales usos del H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> a nivel mundial y su consumo porcentual por sector.



**Figura 2 Consumo mundial y usos del H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>**

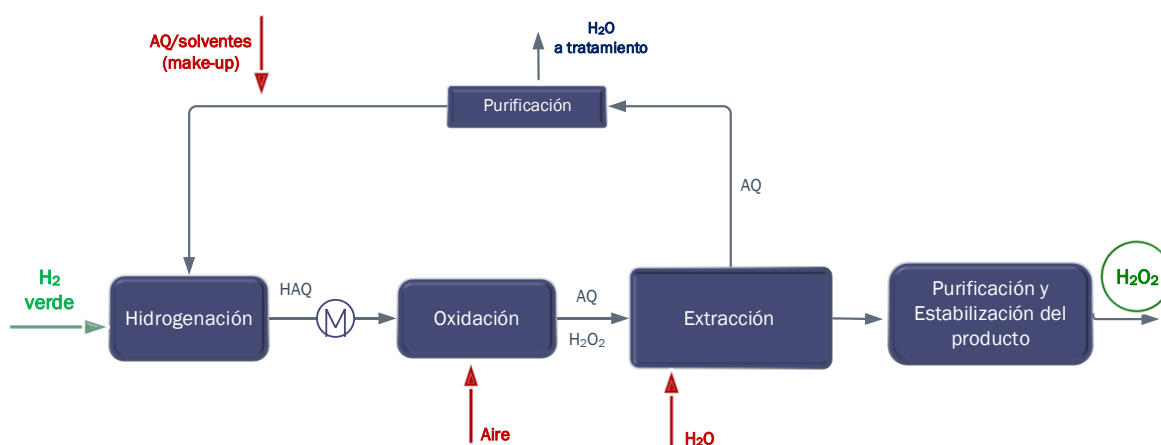


Fuente: Elaboración propia

### 1.3.1.3 Proceso de producción

En la actualidad el H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> es casi exclusivamente producido mediante el denominado “proceso antraquinona”. Se trata de un proceso cíclico, en el cual la antraquinona (AQ) es sucesivamente hidrogenada y oxidada, liberando H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> en cada ciclo. En la Figura 3 se muestra un esquema simplificado del proceso.

**Figura 3 Esquema del proceso antraquinona para la producción de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>**



Fuente: Elaboración propia

### 1.3.2 Formaldehído / Concentrado Urea-Formaldehído (UFC) / Resinas Urea-Formaldehído (R-UF)

#### 1.3.2.1 Producción actual de formaldehído y proyección a nivel global

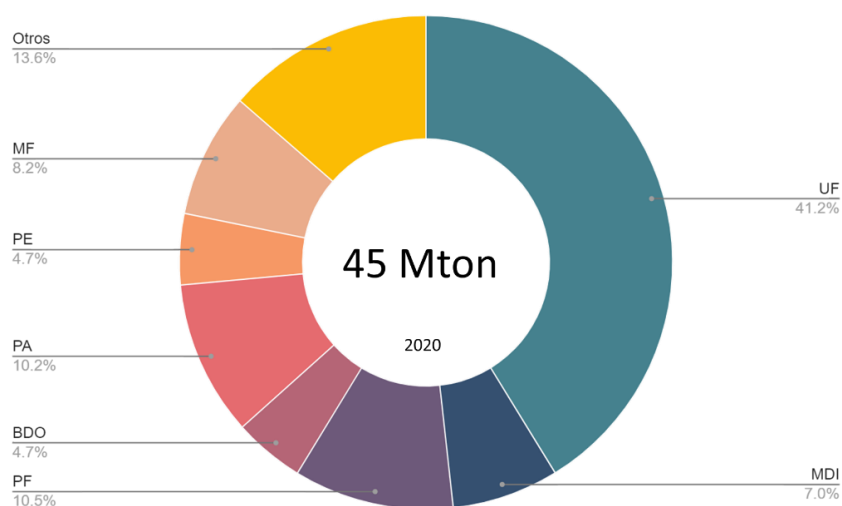
Se prevé que el mercado mundial de formaldehído, estimado en 45 Mton en 2020, alcance las 63 Mton en 2027, con una tasa de crecimiento anual compuesto (CAGR) del 4.9%. Es importante destacar que el formaldehído es un gas a temperatura ambiente. Habitualmente, se comercializa el llamado "formalin", que es una solución acuosa de formaldehído al 37-50%wt.

#### 1.3.2.2 Usos del formaldehído

En la Figura 4 se presentan los porcentajes destinados a los principales derivados del formaldehído. Esta diversidad de productos impacta en una amplia gama de aplicaciones en la industria de construcción, de automotores, aviación, farmacéutica y cosmética.

Como se puede observar, el uso predominante del formaldehído es como materia prima para la producción de resinas de urea-formaldehído (UF), seguido por la síntesis de resinas fenol-formaldehído (PF), poliacetales (PA) o polioximetilenos (POM) y resinas de melamina-formaldehído (MF). Estos compuestos constituyen el 70 % del uso del formaldehído.

**Figura 4 Consumo mundial y usos del formaldehído**



Referencias: resinas urea-formaldehído (UF), resinas fenol-formaldehído (PF), poliacetales (PA), resinas melamina-formaldehído (MF), diisocianato de difenilmetano (MDI), pentaeritritol (PE) y 1,4-butanodiol (BDO).

Fuente: Elaboración propia

### 1.3.2.3 Procesos de producción de Formaldehído / UFC

Prácticamente la totalidad de la producción mundial industrial de formaldehído se obtiene por oxidación catalítica del metanol. Puede verificarse además la formación de subproductos como CO y CO<sub>2</sub>, formiato de metilo, metano y ácido fórmico.

Los procesos industriales de producción de formaldehído se clasifican según se opere con deficiencia o exceso de aire.

#### Procesos con deficiencia de aire (o procesos de catalizadores de plata)

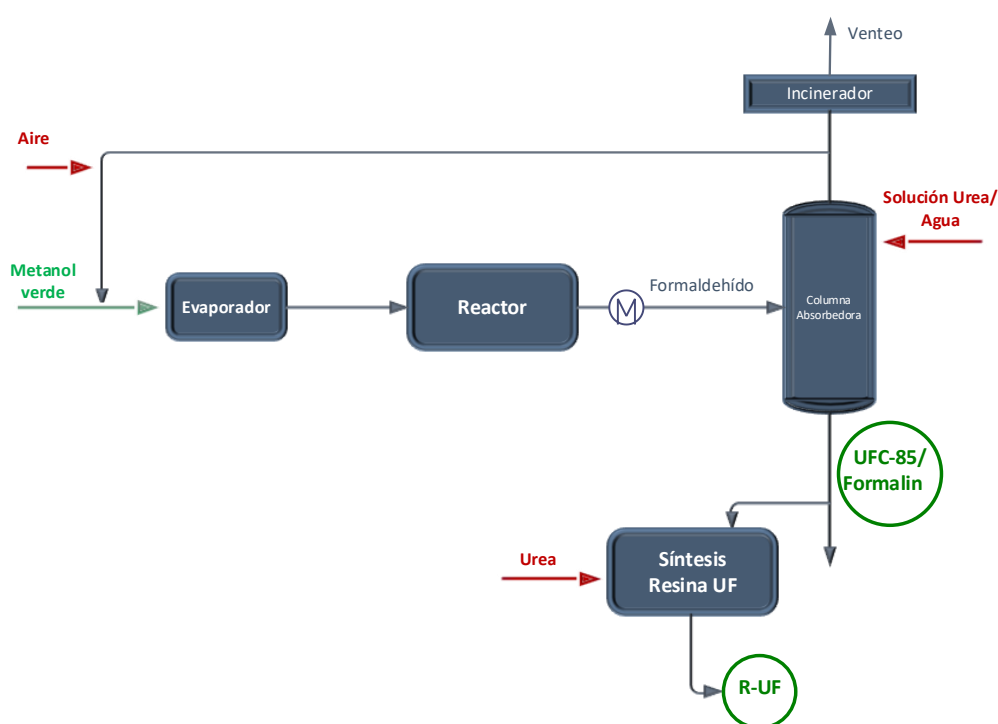
En el proceso deficiente en aire, el metanol reacciona de acuerdo las reacciones de deshidrogenación y oxidación parcial para producir formaldehído. Los principales tecnólogos que usan este proceso son BASF, Borden, Bayer, Degussa, Imperial Chemical Industries (ICI), Celanese, DuPont, Mitsubishi y Mitsui.

#### Procesos con exceso de aire (o proceso FORMOX)

El otro proceso, conocido como proceso Formox, emplea un exceso de aire y sólo tiene lugar la oxidación parcial del metanol (utilizado por Lummus, Montecatini y Hiag/Lurgi).

En la Figura 5 se presenta un esquema del proceso FORMOX para producir soluciones de formaldehído / UFC. Se incluye la producción de resinas urea-formaldehído (R-UF), de acuerdo a la descripción realizada en el punto siguiente.

**Figura 5 Esquema del proceso de producción de Formaldehído (FORMOX)/UFC/R-UF**



Fuente: Elaboración propia

#### 1.3.2.4 Proceso de producción de Resinas Urea-Formaldehído (R-UF)

La producción de R-UF consta de dos etapas: la hidroximetilación (formación del monómero) y la condensación (polimerización). La hidroximetilación se lleva a cabo en medios ligeramente alcalinos o ligeramente ácidos, mientras que la condensación requiere una solución más ácida. La condensación se detiene al alcalinizar el medio.

### 1.3.3 Metilaminas (aminas alifáticas)

#### 1.3.3.1 Producción actual y proyección a nivel global

Las aminas alifáticas o alquilaminas son compuestos químicos orgánicos que contienen el grupo funcional amina ( $-NH_2$ ) unido a radicales alifáticos. Las metilaminas, que incluyen la monometilamina (MMA), la dimetilamina (DMA) y la trimetilamina (TMA) son una serie de aminas alifáticas empleadas en diversos sectores industriales. Estos compuestos son importantes intermediarios químicos en la síntesis de una amplia gama de productos químicos.

La capacidad global de producción de *metilaminas* se estima en unas 650,000 toneladas anuales, con un aumento en torno a un 4.2% por año hasta el año 2032.

#### 1.3.3.2 Usos de las Metilaminas

La dimetilamina (DMA), que tiene la mayor demanda, tiene una amplia aplicación como disolvente. Además, se utiliza en la fabricación de productos agroquímicos, farmacéuticos, de limpieza y surfactantes.

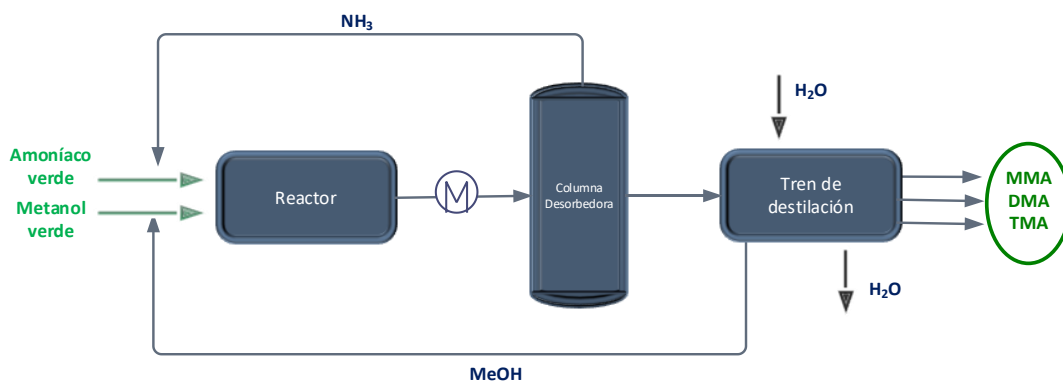
La monometilamina (MMA) ocupa el segundo lugar en términos de demanda. Se utiliza para la fabricación de disolventes, así como para la síntesis química o como materia prima para detergentes.

La trimetilamina (TMA), que desempeña un papel menor, se utiliza en suplementos alimentarios para animales, almidones catiónicos y resinas de intercambio iónico, colorantes y sensores.

#### 1.3.3.3 Proceso de producción

Las metilaminas se producen a partir de metanol en fase vapor junto con amoníaco, utilizando distintas variantes del denominado proceso de Leonard. Un esquema simplificado del proceso de producción de metilaminas se presenta en la Figura 6. Se obtienen las tres variantes en forma conjunta, las cuales son luego separadas en un tren de destilación.

**Figura 6 Esquema del proceso de producción de metilaminas**



Fuente: Elaboración propia

### 1.3.4 Melamina

#### 1.3.4.1 Producción actual y proyección global

La melamina ( $C_3H_6N_6$ ), es un sólido cristalino de color blanco, poco soluble en agua. Actualmente, el tamaño del mercado de melamina se estima en 1.9 Mton anuales y se espera que alcance los 2.3 Mton en 2029, creciendo a una tasa compuesta anual del 4.15% durante este período.

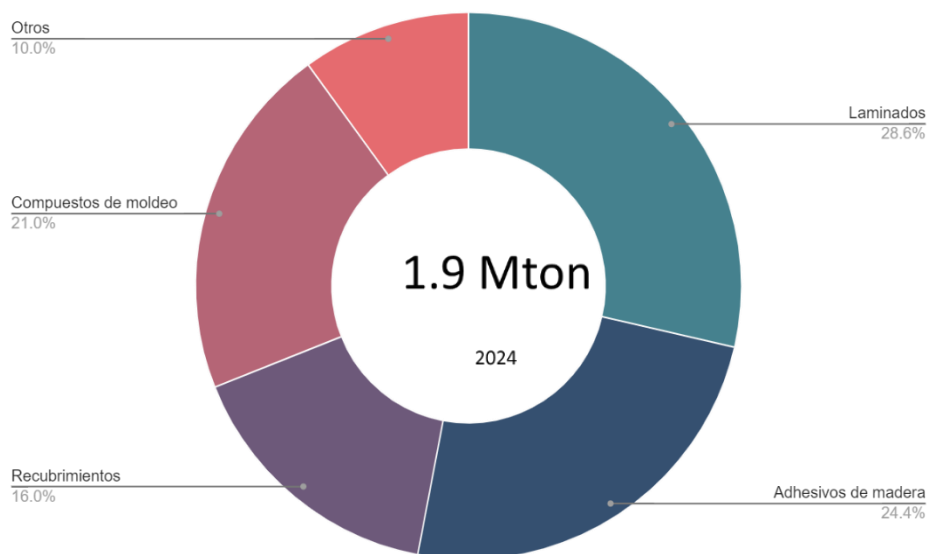
#### 1.3.4.2 Usos

La demanda de melamina está fuertemente influenciada por las actividades de construcción y fabricación de automóviles. Las principales aplicaciones se presentan en la Figura 7 y se listan a continuación:

- Recubrimientos superficiales. Las resinas de melamina-formaldehído (MF) se utilizan para revestimientos de superficies en automóviles, contenedores metálicos, muebles metálicos, revestimientos de bobinas y aparatos eléctricos.
- Laminados. Los laminados se fabrican presionando papel o tela saturado con resina MF bajo presión y temperatura sobre un material central. Los laminados se utilizan en gabinetes, muebles, pisos y diversos tipos de paneles.
- Compuestos de moldeo. Los compuestos de moldeo de melamina-formaldehído se pueden producir mediante moldeo por compresión o inyección y se utilizan para fabricar vajilla, carcasas de electrodomésticos y estuches. Por otro lado, en la industria automotriz también se utiliza la melamina-formaldehído, para la fabricación de cubiertas para ruedas, tableros de instrumentos, luces y manijas de puertas.
- Adhesivos para madera. Los adhesivos para madera modificada con melamina se utilizan en diversos productos de madera, como madera contrachapada, tableros de partículas, tableros de fibra de densidad media (MDF), pisos para camiones y vagones, puertas de muebles y bandejas de madera.

- Otros usos incluyen retardantes de llama, tratamiento de papel y textil, como aditivos para concreto y muchas otras aplicaciones de pequeño volumen.

**Figura 7 Consumo mundial y usos de la melamina**



Fuente: elaboración propia

#### 1.3.4.3 Proceso de producción

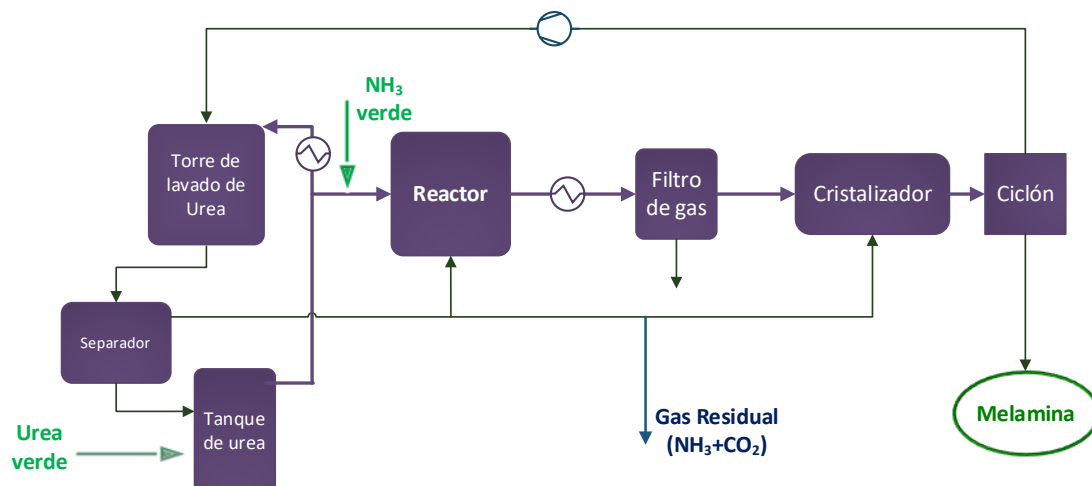
La melamina es industrialmente producida a partir de la descomposición de la urea, en un proceso globalmente endotérmico.

Los procesos de producción pueden ser divididos en dos categorías:

- De baja presión (< 10 atm), catalíticos, ver Figura 8
- De alta presión (> 80 atm), no catalíticos

Indistintamente del tipo de proceso, se identifican tres sectores de planta: síntesis, recuperación y purificación de la melamina, y tratamiento de gases residuales.

**Figura 8 Esquema del proceso de producción de melamina (baja presión)**



Fuente: elaboración propia

Habitualmente, el tratamiento de los gases residuales involucra la conversión total o parcial de estos (mezcla de  $\text{NH}_3$  y  $\text{CO}_2$ ) nuevamente en urea. Por esta razón, las plantas de producción de melamina suelen estar ubicadas en la vecindad de una planta de producción de urea, de la que obtienen su alimentación y a la que le retornan los gases residuales como materia prima para producir más urea.

### 1.3.5 Polioximetileno (POM)

#### 1.3.5.1 Producción actual y proyección global

El polioximetileno (POM), también conocido como acetal, poliacetal y poliformaldehído, es un material polimérico semicristalino que pertenece al grupo de los termoplásticos de ingeniería. Se destaca por sus características de baja fricción y desgaste, así como su excelente equilibrio entre propiedades mecánicas y resistencia química. El mercado mundial de POM alcanzó aproximadamente 1.4 Mton en 2022 y se espera que crezca a una tasa compuesta anual del 4.4 % durante el período previsto hasta 2032, donde se prevé que alcance los 2.15 Mton.

#### 1.3.5.2 Usos

El polioximetileno (POM) tiene una combinación equilibrada de propiedades favorables como dureza, rigidez, tenacidad y resistencia a los combustibles. El POM se utiliza en casi todos los sectores de la industria y la tecnología. Las principales áreas de consumo de POM se describen a continuación:

- Sector automotriz: se emplea en la fabricación de repuestos para bombas, medidores de gasolina, cadenas, clips, cierres de tanques, separadores de agua, carcasas de cerraduras, aspas de ventiladores, parrillas de parlantes, módulo de tanque de combustible y repuestos para cinturones de seguridad.

- Industria eléctrica y electrónica: dada las propiedades de aislamiento eléctrico del POM, se emplea en la producción de conectores, interruptores, y pequeños engranajes.
- Bienes de consumo: se emplea en diversas aplicaciones, como cremalleras, hebillas, manijas, perillas, sujetadores y juguetes.
- Construcción: empleado como material en el moldeo por inyección y extrusión. Posee gran ductilidad, resistencia y rigidez.
- Otros: ingeniería mecánica y aplicaciones industriales; válvulas, pistones, cojinetes, engranajes, componentes de sistemas transportadores y otras piezas mecánicas de precisión que requieren alta resistencia, baja fricción y estabilidad dimensional. Tecnología médica; instrumentos quirúrgicos, dispositivos de administración de medicamentos, implantes ortopédicos, componentes dentales y otros equipos médicos. A su vez, se utiliza en bombas, válvulas, impulsores, accesorios y otros componentes que entran en contacto con productos químicos, combustibles o fluidos corrosivos (Europlas).

### 1.3.5.3 Proceso de producción

El polioximetileno se obtiene por polimerización de formaldehído de alta pureza por apertura del enlace carbonilo  $C = O$  en fase gas. La Figura 9 muestra un esquema simplificado del proceso de producción de POM.

**Figura 9 Esquema del proceso de producción de POM**



Fuente: elaboración propia

## 1.4 Casos de estudio

Del conjunto de casos candidatos y, en conjunto con la contraparte, se seleccionó un caso para la línea del metanol y otro para la línea del amoníaco: la producción de **formaldehído para resinas** y la producción de **melamina**, respectivamente.

### 1.4.1 Formaldehído para resinas

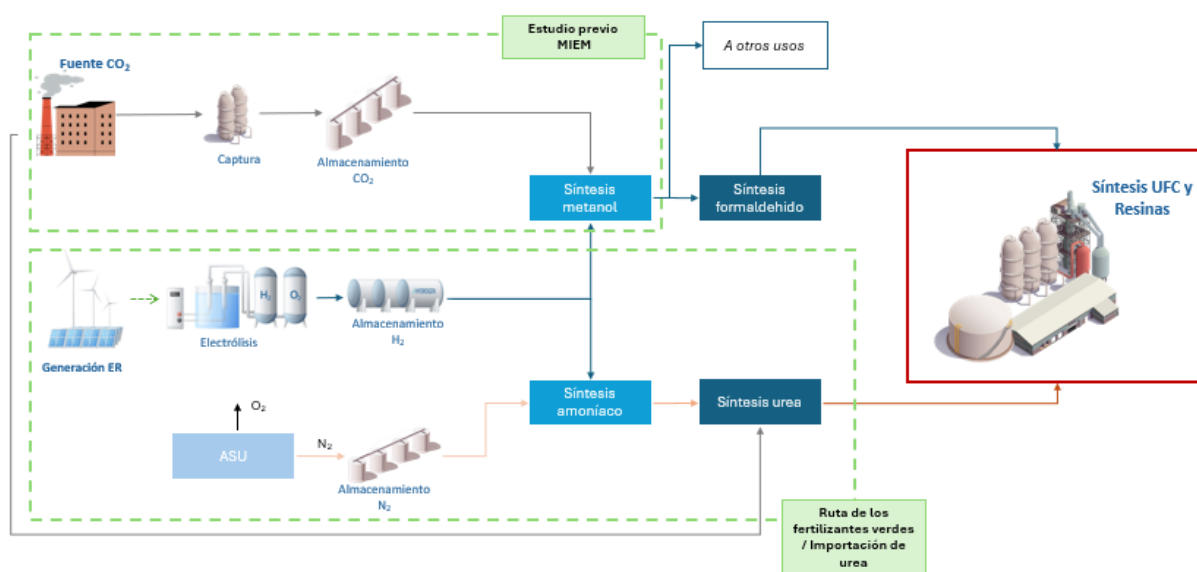
**Características, usos y transporte al mercado.** Se escogió una combinación de concentrado de urea formaldehído al 85% (UFC 85) y de resinas urea-formaldehído (UF), ya que poseen diferentes características en cuanto a su estabilidad que imponen límites en términos de distancias de transporte y rutas al mercado.



El UFC 85 se utiliza principalmente en la producción de resinas termoestables y en diversos productos orgánicos y agrícolas. Para producir las resinas UF se genera como intermediario el concentrado Urea Formaldehído (UFC 85). Las resinas UF tiene estabilidad más reducida por lo que el mercado potencial a abastecer quedó restringido al mercado regional (Brasil, Argentina y Paraguay); mientras que para el UFC 85 se supuso que el mercado potencial de destino es global (principalmente Europa).

**Proceso productivo.** La producción de resinas UF se realiza a partir de materias primas convencionales; metanol y urea grises. Para reducir las emisiones y potenciar el uso de hidrógeno verde y sus derivados en Uruguay, pueden reemplazarse el metanol y la urea por aquellos producidos mediante métodos de bajo carbono. La Figura 10 muestra el esquema simplificado de la cadena de valor y la frontera del análisis para este estudio (línea en rojo).

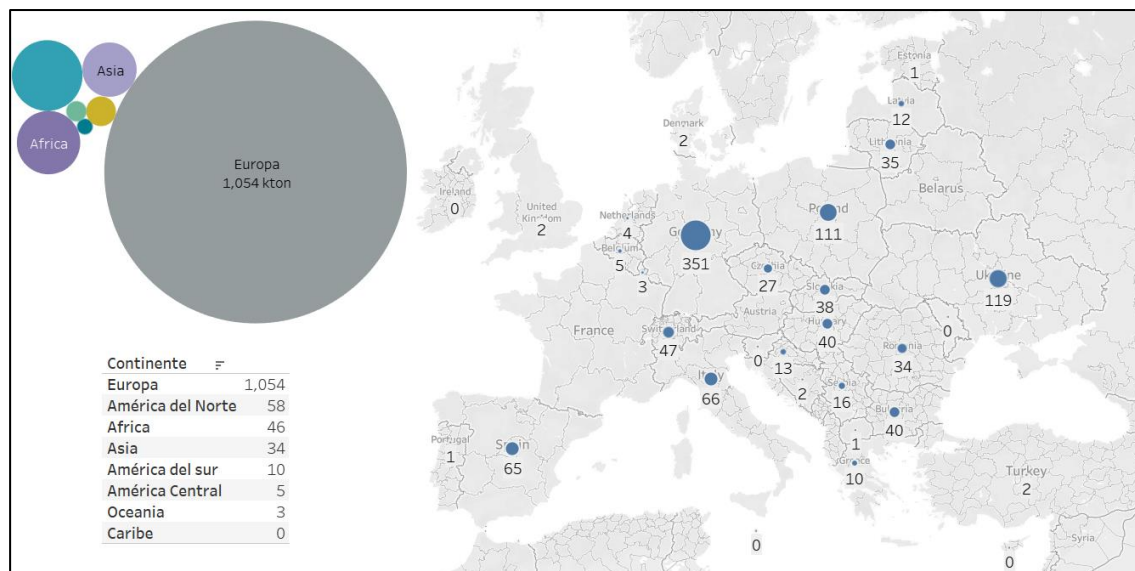
**Figura 10 Esquema simplificado de producción de UFC y fronteras del análisis**



Fuente: elaboración propia

**Demanda y mercados.** El **mercado global** de UFC y resinas urea formaldehído se encuentra en un momento de expansión, impulsado por diversos factores, entre los que destacan la creciente demanda de productos elaborados con madera contrachapada, tableros de partículas y adhesivos, así como el aumento de las aplicaciones en las industrias de la construcción y muebles. Europa se consolida como el principal destino de estas exportaciones, con Alemania como principal importador. China e India son países muy relevantes en el sector, tanto en producción como en consumo propio. En la Figura 11 se muestran las dimensiones del mercado global para estos productos.

**Figura 11 Importaciones globales de UFC y Resinas UF, en kta**



Fuente: elaboración propia

En el **mercado regional**, se destacan Argentina, Brasil y Paraguay.

**Precios de venta.** Tanto las resinas UF como el concentrado UFC 85 son compuestos químicos intermedios y no se dispone de series de precios internacionales homogéneas como ocurre con compuestos químicos básicos como el metanol y el amoníaco. Por el contrario, la información relevada es dispersa, puntual, y proviene de distintas fuentes, presentando variaciones significativas.

A esto se suma la volatilidad propia del mercado, influenciada no sólo por la variación en el costo de los insumos principales (metanol, urea y amoníaco correlacionados con el precio del gas natural) sino también por el balance entre la oferta y la demanda, disrupciones en las cadenas de suministro, entre otros factores. Estas condiciones combinadas crean un entorno dinámico, donde las referencias de precios evidencian una significativa dispersión.

Para este estudio, los precios considerados se encuentran en el rango entre 600 y 700 USD por tonelada para la resina y 800 y 1,000 USD para UFC 85, ya que estos fueron los más comúnmente relevados en las fuentes analizadas.

El mercado global tiene numerosos actores clave que contribuyen de forma significativa al crecimiento del sector, impulsado principalmente por las economías emergentes.

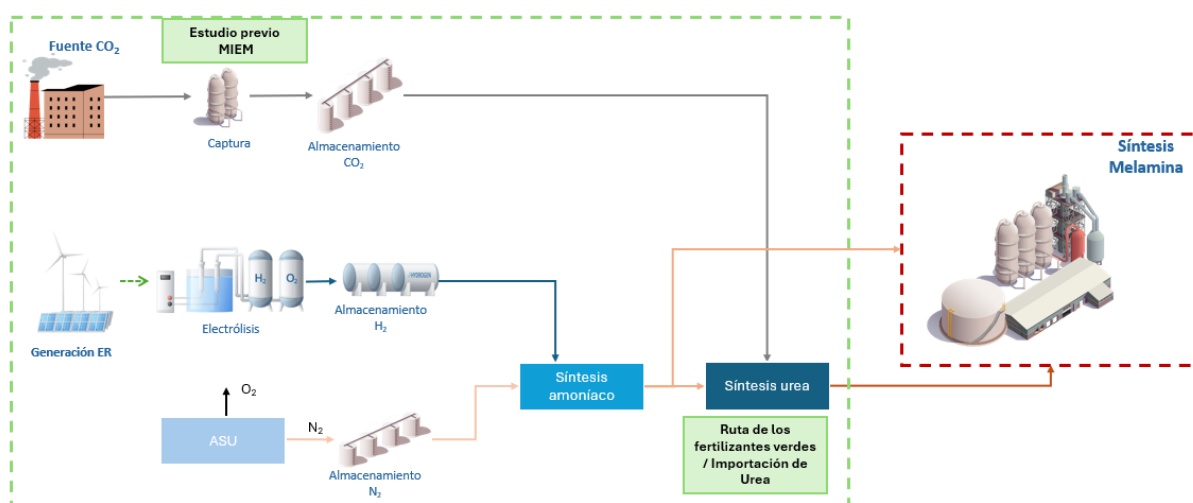
#### 1.4.2 Melamina

**Características, usos y transporte al mercado.** La melamina es un compuesto orgánico heterocíclico, cristalino e incoloro; ampliamente utilizada en diversas industrias para crear productos plásticos termo endurecibles que son duraderos y resistentes al calor, como platos, tazones y utensilios de cocina. Además, estas resinas se utilizan en tableros de partículas, mejorando su resistencia al calor y a la humedad; y en materiales retardantes

de llamas (ropa protectora como los uniformes de bomberos, revestimientos de paredes y pisos) y también como aislante acústico y térmico.

**Proceso productivo.** Se puede sintetizar a partir de varios precursores químicos, siendo la urea el material de partida más común. El esquema del proceso se muestra en la Figura 12. Durante el proceso de fabricación, la urea se descompone en ácido ciánico, que posteriormente reacciona para formar melamina.

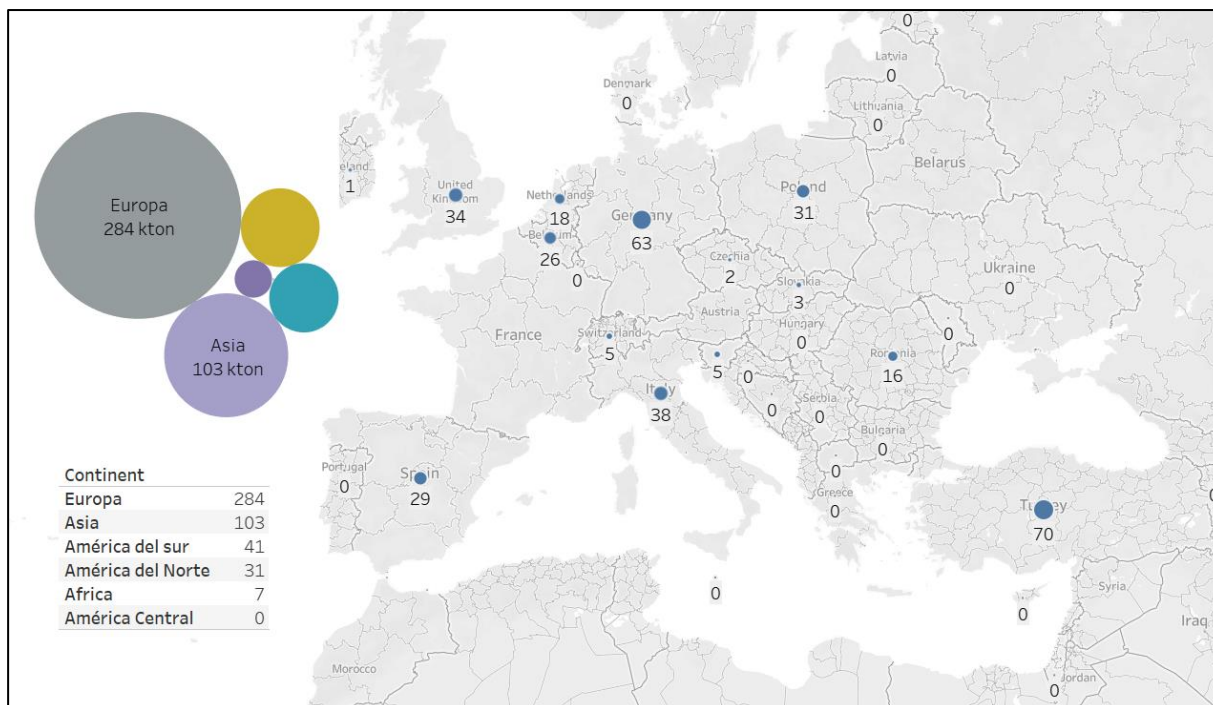
**Figura 12 Esquema simplificado de producción de melamina baja en carbono**



Fuente: elaboración propia

**Demanda y mercados.** La melamina es un mercado que se expande y cubre un amplio espectro de aplicaciones en crecimiento. Europa y Asia se consolidan como los principales destinos de estas exportaciones, con Alemania y Turquía a la cabeza respectivamente. China desempeña un papel crucial en el mercado global de la melamina debido a su significativa capacidad de producción, altos niveles de producción y gran importancia en el mercado exportador. La Figura 13 muestra la relevancia de las importaciones en Europa y Asia comparadas con el resto del mundo, y además la importancia de los principales países (Turquía, Alemania, Italia, Polonia, Reino Unido y España).

**Figura 13 Importaciones globales de Melamina, en kta**



Fuente: elaboración propia

En cuanto al **mercado regional**, se destacan los mercados de Brasil y Argentina. En particular, Brasil tiene gran relevancia en el mercado regional, siendo por amplio margen el principal país importador de estos productos. El principal origen de estas importaciones es China, seguido por Singapur.

**Precios de venta y principales proveedores.** Al igual que para el caso de UFC 85 y resinas urea formaldehído, estimar el precio de venta de la melamina es una tarea compleja. Este precio es altamente volátil, dependiendo del costo de las materias primas (amoníaco y urea), dinámicas de mercado (desequilibrios entre la oferta y demanda), disrupciones en las cadenas de suministro, condiciones económicas globales. Para el estudio se consideró un rango usual de variación de precio de melamina entre 900-1,400 USD/ton. Cabe destacar que la posición predominante de China en el mercado puede generar barreras de entrada y dificultad de competir debido a las economías de escala.

## 1.5 Dimensionamiento de la planta y costos principales

### 1.5.1 Formaldehído para resinas

**Escala de trabajo y descripción conceptual del caso.** Se desarrolla el diseño conceptual de una planta de producción de concentrado urea-formaldehído (UFC 85) y de resinas de urea-formaldehído (R-UF). Se plantea una producción de 6,100 toneladas por año de UFC 85 y 2,000 toneladas por año de R-UF. Los productos y la escala de producción

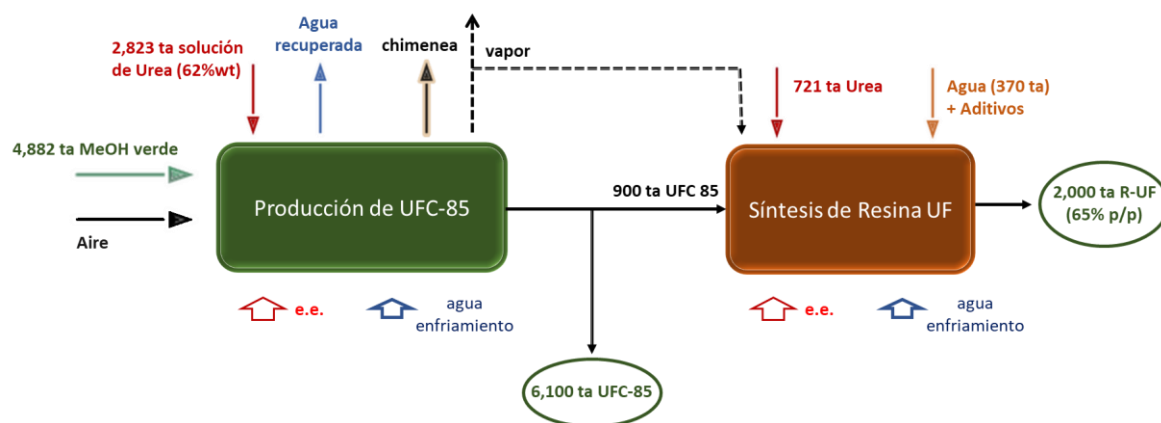
se establecieron considerando principalmente:

- Tamaño del mercado potencial de exportación, a nivel regional (Brasil, Paraguay y Argentina) y global (Europa). La producción de resinas representa un 16.6% del mercado regional, mientras que para UFC 85 alcanza un 0.6% del mercado europeo.
- Distancias y logística de transporte.

Además, se ha verificado que plantas de las dimensiones establecidas han sido reportadas en la literatura abierta.

**Selección de la tecnología.** Se selecciona una tecnología de tipo FORMOX para producir el UFC 85 (esta tecnología permite llegar al nivel de concentración deseado del 85%). La resina urea-formaldehído se obtiene a partir de una operación tipo *batch* (discontinuo). Se realizó el dimensionamiento básico de cada uno de los equipos principales del proceso y se evaluó la inversión necesaria y los principales consumos. La Figura 14 esquematiza las principales corrientes de entrada y salida del proceso de producción de UFC 85 y de la planta de resina R-UF. Se alimentan a la unidad de producción de UFC 85 4,882 ta de metanol verde, las cuales, junto con aire de proceso (19,387 ta), se transforman en formaldehído. Este es absorbido en una solución de urea (2,823 ta, 62 %wt de urea en agua) para dar 7,000 ta de UFC 85. De esta corriente, 6,100 ta se comercializan directamente. Las 900 ta restantes se alimentan a la unidad de Síntesis de Resinas UF como materia prima para la producción de 2,000 ta de R-UF (al 65% wt). Se requiere aquí la alimentación adicional de 721 ta de urea. El proceso estudiado requiere energía eléctrica para el funcionamiento de bombas y soplantes, produce vapor en exceso (de alta presión) y requiere disponer de agua de enfriamiento.

**Figura 14 Balances de masa del proceso de UFC 85 / R-UF**



Fuente: elaboración propia

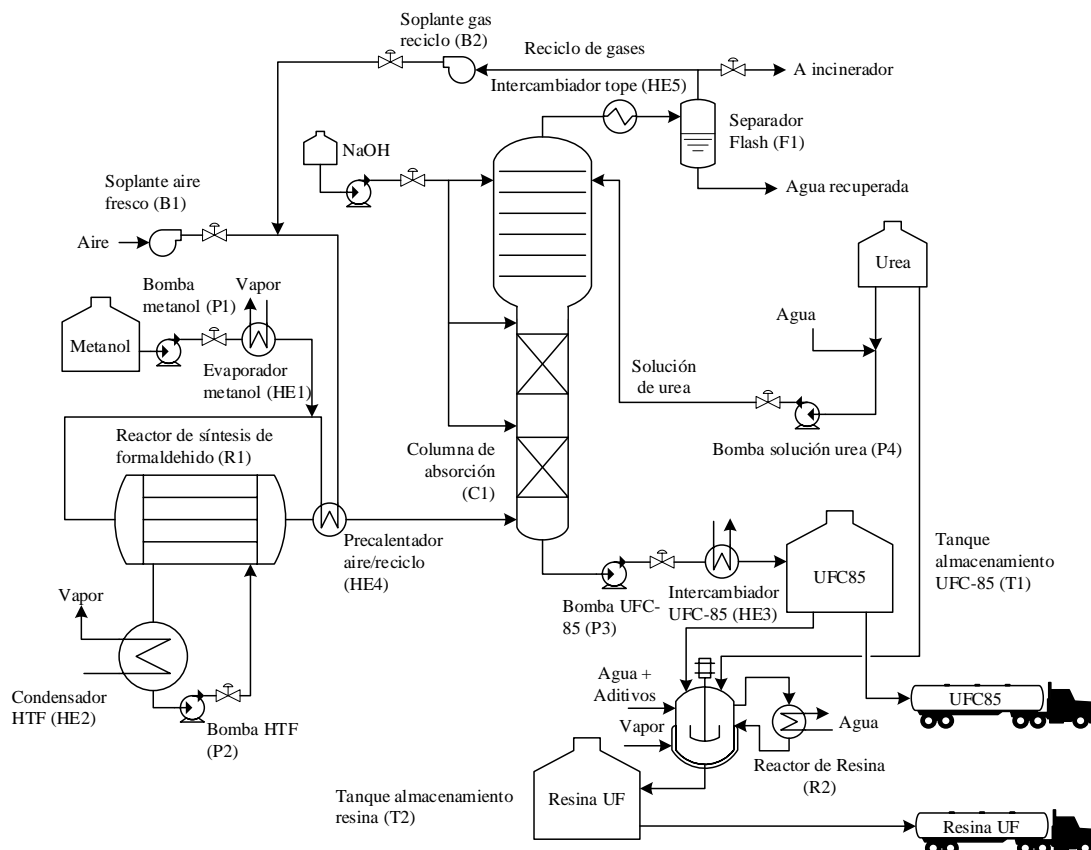
**Dimensionamiento de equipos principales.** En la Tabla 1 se reporta el detalle de equipos (ver referencias en Figura 15), con los parámetros característicos de cada uno de ellos, los cuales son requeridos en la siguiente etapa de evaluación económica. Los principales equipos son: soplate de aire fresco, soplate de gas de reciclo, evaporador de

metanol, reactor multitubular, condensador HTF (Heat Transfer Fluid), bomba HTF, precalentador de aire de reciclo, columna absorbadora, separador Flash, bombas, intercambiadores de calor, tanques de almacenamiento.

**Tabla 1 Equipos incluidos en las plantas de UFC 85 y Resina UF**

Equipo	Parámetro característico	Observaciones
<b>Soplante aire fresco (B1)</b>	24.9 kW	
<b>Soplante gas reciclo (B2)</b>	55.7 kW	
<b>Bomba metanol (P1)</b>	0.3 kW	
<b>Vaporizador metanol (HE1)</b>	6.4 m <sup>2</sup>	Tipo Kettle Carga térmica: 124 kW
<b>Reactor multitubular (R1)</b>	339.3 m <sup>2</sup>	Nºtubos: 4,000 dti = 1.8 cm
<b>Condensador HTF (HE2)</b>	9.7 m <sup>2</sup>	Carga térmica: 772.2 kW
<b>Bomba HTF (P2)</b>	0.3 kW	
<b>Precalentador aire/reciclo (HE4)</b>	358.4 m <sup>2</sup>	Carga térmica: 336.6 kW
<b>Columna absorbadora (C1)</b>	26.3 m <sup>3</sup>	Ac. inoxidable, 20 platos - plato de burbujeo (Sieve Tray)
<b>Bomba UFC 85 (P3)</b>	6 kW	Reciprocante o cilindro pistón, Ac. inoxidable
<b>Intercambiador UFC 85 (HE3)</b>	31 m <sup>2</sup>	Ac. inoxidable
<b>Bomba solución urea (P4)</b>	2.2 kW	
<b>Intercambiador tope columna (HE5)</b>	134 m <sup>2</sup>	
<b>Separador Flash (F1)</b>	4.3 m <sup>3</sup>	
<b>Tanque almacenamiento UFC 85 (T1)</b>	50 m <sup>3</sup>	Ac. inoxidable
<b>Reactor resina (R2)</b>	10 m <sup>3</sup>	Ac. inoxidable
<b>Tanque almacenamiento resina (T2)</b>	50 m <sup>3</sup>	

**Figura 15 Diagrama de proceso de producción de UFC 85 / R-UF**



Fuente: elaboración propia

**Cálculo de costos de equipos y consumos.** Para la estimación de costos se empleó el método de estimación de costos del NETL (*National Energy Technology Laboratory*). Dicho método consiste en la evaluación del BEC (*Bare Erected Cost*), el cual contempla el costo de equipo, accesorios y mano de obra directa e indirecta. El CAPEX estimado para la planta de UFC 85 es de 5 millones de USD. A esto se suma el CAPEX estimado para la planta de resina UF y los tanques de almacenamiento de los productos (UFC 85 y resina UF), estimado en 0.7 millones de USD; totalizando 5.7 millones de USD. Los principales consumos corresponden al metanol (4,882 ta), urea (1,750 ta), agua de enfriamiento y de proceso, consumo eléctrico, catalizadores (detalle en Tabla 2).

**Tabla 2 Consumos de las plantas de UFC 85 y R-UF**

	Planta UFC 85	Planta resina UF
<b>Metanol (ton/año)</b>	4,882	-
<b>Urea (ton/año)</b>	1,750	721



Agua de enfriamiento (m <sup>3</sup> /h)	68	1.7
Agua de proceso (m <sup>3</sup> /h)	0.13	0.044
Consumo eléctrico (MWh/año)	751	40
NaOH (kg/año)*	2,450	3.5
Catalizador (kg/año)**	680	

\* Precio NaOH = 0.35 USD/kg

\*\*Costo catalizador = 30 USD/kg

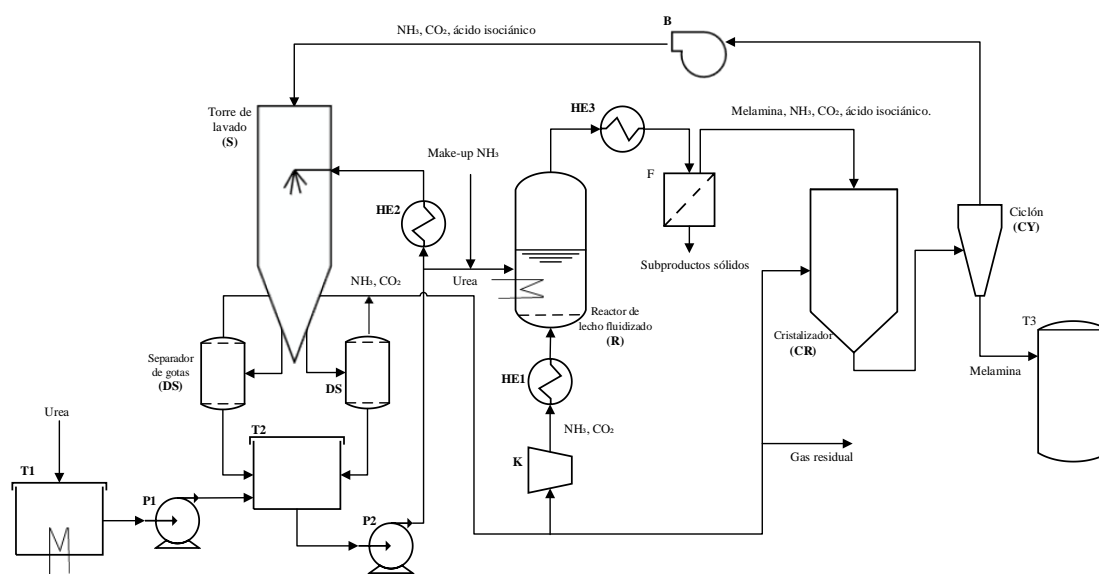
Adicionalmente, se consideran gastos fijos de operación y mantenimiento equivalentes a 2% del valor del CAPEX.

### 1.5.2 Melamina

**Escala de trabajo y descripción conceptual del caso** Para el dimensionamiento conceptual del proceso se consideró una capacidad de producción de 25,600 tonelada por año de melamina, basada en información de una planta industrial de esa escala y consideraciones de mercado (el volumen adoptado representa cerca del 5% del mercado global).

**Selección de tecnología.** La planta tomada como referencia utiliza tecnología de baja presión, más específicamente el proceso BASF (Figura 16). Se estimaron las inversiones necesarias para montar la planta los principales consumos (eléctricos y de servicios). Un esquema con las principales corrientes de entrada-salida del proceso de producción de melamina se presenta en la Figura 17.

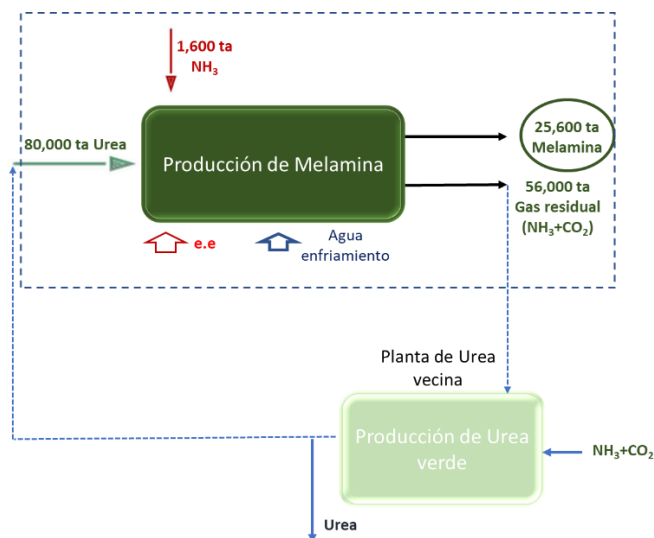
**Figura 16 Diagrama de proceso BASF de producción de melamina**



Fuente: elaboración propia



**Figura 17 Balances de masa del proceso de producción de melamina**



Fuente: elaboración propia

Es importante destacar que las plantas de producción de melamina se diseñan en forma integrada con una planta de producción de urea con el fin de aprovechar la corriente de gas residual de la planta de melamina que contiene  $\text{NH}_3 + \text{CO}_2$ . Este gas residual se transforma nuevamente en urea en la planta adyacente, reduciendo significativamente los costos de producción de melamina, al mismo tiempo que minimiza riesgos ambientales.

La urea de alimentación junto con el *make up* de amoníaco ingresan al proceso. Se requiere 3.125 ton Urea/ton Melamina, por lo tanto, para la producción de 25,600 ta de melamina se requieren 80,000 ta Urea. Se alimentan además 1,600 ta de amoníaco para minimizar la generación de productos secundarios. Las corrientes de salida del proceso son la melamina en polvo y una corriente de gas residual de 56,000 ta que contiene  $\text{NH}_3 + \text{CO}_2$ . Este gas residual se transforma en urea en la planta de urea vecina. Esta corriente de gas residual equivale a aproximadamente 41,600 ta de urea.

Esta sinergia entre la planta de melamina y la de urea mejora sensiblemente la economía del proceso. Un resumen del balance de masa del proceso se reporta en la Tabla 3.

**Tabla 3 Balance de masa del proceso de producción de melamina**

Corriente	Entrada (ta)	Salida (ta)
Urea verde	80,000	
Amoníaco	1,600	
Melamina		25,600
Gas residual ( $\text{NH}_3 + \text{CO}_2$ )		56,000

El proceso estudiado requiere energía eléctrica para calentamiento y funcionamiento de bombas, un compresor y un soplante. Se requiere además agua de enfriamiento. La planta no demanda vapor de servicio.

**Dimensionamiento de equipos principales.** La urea granulada se funde en un recipiente con calentamiento eléctrico y es alimentada al reactor catalítico de lecho fluidizado. Como catalizador se utiliza alúmina y como gas de fluidización se usa una mezcla de  $\text{NH}_3$  y  $\text{CO}_2$ , con la misma composición que el gas residual de proceso. Dado que la reacción es endotérmica, el reactor debe ser calefaccionado continuamente para mantener la temperatura de reacción en los niveles deseados.

El gas que deja el reactor es una mezcla de melamina gaseosa, trazas de subproductos y urea no reaccionada (en la forma de sus productos de descomposición: ácido isociánico y  $\text{NH}_3$ ). El resto de la corriente de salida está constituido por  $\text{NH}_3$  y  $\text{CO}_2$ .

Aguas abajo del reactor, la mezcla gaseosa es enfriada y filtrada, más del 98% de la melamina cristaliza bajo la forma de cristales finos. La corriente de gas residual (mezcla de  $\text{NH}_3$  y  $\text{CO}_2$ ) es enviada a una planta contigua para volver a sintetizar urea. Cuando se recicla el gas residual bajo la forma de urea, se necesitan aproximadamente 1.5 ton de urea fresca para producir una tonelada de melamina, lo cual se corresponde con el rendimiento del 95%. Cuando este reciclo de urea no está presente, el rendimiento cae sensiblemente, hasta valores menores al 50%.

**Cálculo de costos de equipos y consumos.** El caso de estudio seleccionado produce melamina (25,600 ta) y una corriente de gas residual conteniendo  $\text{NH}_3 + \text{CO}_2$  (56,000 ta). Se requiere alimentación de urea verde (80,000 ta) + amoníaco verde (1,600 ta). La planta consume energía eléctrica y agua de enfriamiento. El CAPEX total estimado es de 18.4 millones de USD.

## 1.6 Emisiones de $\text{CO}_2$

### 1.6.1 Formaldehído para resinas

La huella de carbono para la producción de resina UF se determina por el equivalente de  $\text{CO}_2$  de todas las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) durante su ciclo de vida, en este caso el análisis realizado incluye las emisiones dentro del proceso de producción del UFC y las resinas y las emisiones de los procesos de producción de sus insumos principales: metanol y urea.

El proceso convencional de producción de UFC/resinas UF produce 1,6 kg  $\text{CO}_2\text{eq/kg}$  UF. El metanol convencional se produce a partir de gas natural y emite 0,8 kg  $\text{CO}_2\text{eq/kg}$  MeOH. Si se lo reemplaza por e-metanol, combinando hidrógeno verde (producido con electricidad renovable) con una fuente de dióxido de carbono biogénica, entonces las emisiones al final del ciclo de vida no tienen ningún impacto climático neto.

Análogamente la urea convencional producida a partir de amoníaco a base de gas natural como materia prima emite 0,73 kg $\text{CO}_2\text{eq/kg}$  urea. El ahorro de las emisiones

correspondientes a la síntesis de urea queda sujeto a la utilización de urea verde como insumo.

El ahorro de emisiones si se reemplaza el metanol por e-metanol es de 3,905 tonCO<sub>2</sub>eq/año. Si se reemplaza el metanol y la urea por e-metanol y e-urea el ahorro de emisiones es 5,709 tonCO<sub>2</sub>eq/año.

Este ahorro de emisiones representa las emisiones de CO<sub>2</sub> equivalentes de aproximadamente 1.240 autos/año.

Es importante considerar que el formaldehído está catalogado como un probable carcinógeno humano por el Centro Internacional de Investigaciones sobre el Cáncer (CIIC). La exposición a niveles elevados de formaldehído puede tener efectos perjudiciales para la salud humana. Por ende, requiere implementar precauciones y medidas de seguridad al trabajar con formaldehído de grado industrial, con el fin de minimizar los riesgos tanto para los trabajadores como para el medio ambiente.

### 1.6.2 Melamina

La huella de carbono para la producción de melamina se determina por el equivalente de CO<sub>2</sub> de todas las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) durante su ciclo de vida. Las alternativas verdes planteadas en este estudio se basan en el mismo proceso de síntesis utilizado en la actualidad, pero alimentado tanto de amoníaco como urea verde.

Al igual que el amoníaco verde, la alternativa convencional se produce a partir del proceso de Haber Bosch, con la diferencia que tanto el nitrógeno como el hidrógeno suministrado proviene del reformado con vapor (SMR por sus siglas en inglés). Este proceso emite alrededor 1.8 kgCO<sub>2</sub>eq/kg NH<sub>3</sub>. De forma similar, la producción convencional de urea a partir de amoníaco a base de gas natural como materia prima emite 0,73 kgCO<sub>2</sub>eq/kg urea.

Las plantas de melamina gris, además de los reactivos presentan un quemador de gas natural para calentamiento de sustancias. En el caso de melamina verde, este calentamiento podría realizarse a partir de electricidad renovable, reduciendo aún más las emisiones respecto a su alternativa gris.

El ahorro de emisiones si se reemplaza el amoníaco por amoníaco verde, la urea por urea verde y el gas natural para calentamiento por electricidad renovable es de 39,806 tonCO<sub>2</sub>eq/año.

Este ahorro de emisiones representa las emisiones de CO<sub>2</sub> equivalentes de aproximadamente 6,500 autos/año<sup>2</sup>.

---

<sup>2</sup> Este cálculo está basado en las emisiones que produce un auto por año de 4,6 tonCO<sub>2</sub>eq/año (<https://www.epa.gov/greenvehicles/greenhouse-gas-emissions-typical-passenger-vehicle>)

## 1.7 Análisis económico

La evaluación económica de los casos de estudio fue desarrollada considerando las inversiones necesarias para materializar los proyectos (CAPEX) y los costos necesarios para su operación y mantenimiento (OPEX). Se estimó el valor de uno de los indicadores usualmente empleados en la evaluación de proyectos para medir su competitividad: el costo nivelado del producto final X (LCOX, por sus siglas en inglés), sea éste el concentrado de urea formaldehído (UFC 85) o la melamina.

Es importante destacar que el análisis realizado corresponde a la etapa de concepto en el desarrollo de proyectos, y las estimaciones económicas son preliminares. Resulta necesario profundizar el análisis si se desea avanzar con un caso de negocio; en particular se recomienda relevar información precisa en cuanto potenciales demandantes, disponibilidad a pagar por el producto de bajas emisiones y rutas al mercado.

### 1.7.1 Formaldehído para resinas

**Caso base.** Para la producción de resina UF y UFC 85 en el caso base, se considera el uso de metanol de origen verde, con un costo de 886.7<sup>3</sup> USD/ton MeOH, y urea gris, con un costo estimado de 328 USD/ton urea<sup>4</sup>.

Con estas consideraciones, se alcanza un costo de 932 USD/ ton UFC 85, ubicándose en el rango superior de los precios relevados en el mercado. El 65% del costo total se atribuye al costo del metanol verde; mientras que el costo de la urea gris representa un 12% (Figura 18).

Realizando el mismo análisis, pero suponiendo que también se descarboniza la síntesis de urea<sup>5</sup>, la participación relativa de este insumo aumenta a un 20%. En este caso, el costo del metanol sigue siendo el más relevante, representando el 59% (Figura 19). El costo nivelado del producto final UFC85 alcanza los 1,055 USD por tonelada de UFC85.

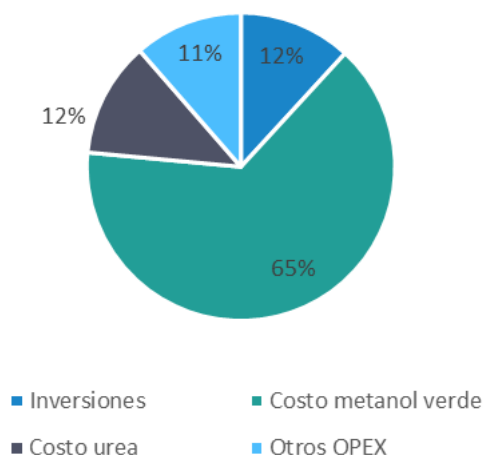
---

<sup>3</sup> El costo del metanol verde corresponde al valor medio estimado en un estudio anterior, equivalente a un costo de los insumos principales H<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> de 3.6 USD/kg y 74 USD/ton CO<sub>2</sub>, respectivamente.

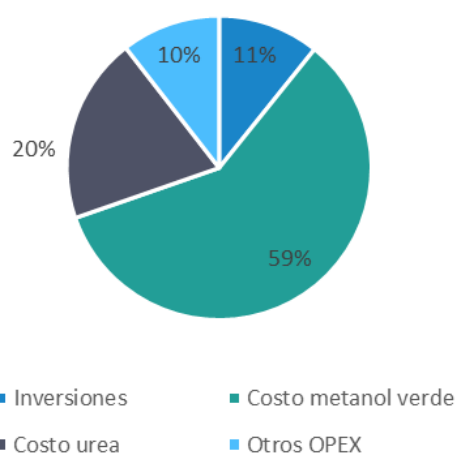
<sup>4</sup><https://www.indexmundi.com/es/precios-de-mercado/?mercancia=urea&meses=120&moneda=uyu>

<sup>5</sup> Para esta estimación, se asumió un costo de producción de urea verde de 590 USD por tonelada (equivalente a un costo de hidrógeno de 3.6 USD por kilogramo).

**Figura 18 Desglose de costos UFC85, costo urea (gris) 328 USD/ton**



**Figura 19 Desglose de costos UFC85, costo urea (verde) 590 USD/ton**



Fuente: elaboración propia

Cabe también señalar que, si bien el caso de estudio se centra en las plantas de resinas y concentrado de urea-formaldehído, este proceso representa el eslabón final de la cadena de valor del hidrógeno verde. Además, requiere importantes inversiones aguas arriba: en el parque de generación renovable, en la producción del hidrógeno verde (electrolizadores), en la planta de captura de CO<sub>2</sub> y en el proceso de síntesis de metanol, a las que también podría sumarse la cadena de valor para producir urea verde.

**Análisis de sensibilidad.** Para analizar la relación del costo de UFC 85 con los costos de sus insumos principales, metanol y urea, se realizó un análisis de sensibilidad. En este análisis, se varió el costo del metanol entre 500 y 1,000 USD por tonelada, y el de la urea entre 200 y 800 USD por tonelada.

El impacto de las variaciones en el costo del metanol sobre el costo nivelado de producción de UFC 85 es mucho más significativo que las variaciones en el costo de la urea. En efecto, un incremento del 100% en el costo nivelado de la urea impacta en menos de un 25% sobre el costo del UFC 85. En cambio, un aumento del 100% en el costo de producción del metanol representa un incremento superior al 60% en el costo final del UFC 85.

Los valores obtenidos para el costo nivelado de producción de UFC 85 se presentan en la Tabla 4. Cuando los costos tanto de metanol como de urea son más elevados, en el rango de los estimados para el e-metanol y la e-urea, el costo nivelado del UFC 85 se sitúa en un rango poco competitivo si se lo compara con los actuales precios de referencia de mercado para el mismo producto gris.

**Tabla 4 Costo nivelado de producción de UFC 85: Análisis de sensibilidad**

		Metanol					
		500	600	700	800	900	1000
Urea	200	514	606	699	792	884	977
	300	561	653	746	839	931	1024
	400	608	700	793	886	978	1071
	500	655	747	840	932	1025	1118
	600	702	794	887	979	1072	1165
	700	749	841	934	1026	1119	1212
	800	796	888	981	1073	1166	1259

Fuente: elaboración propia

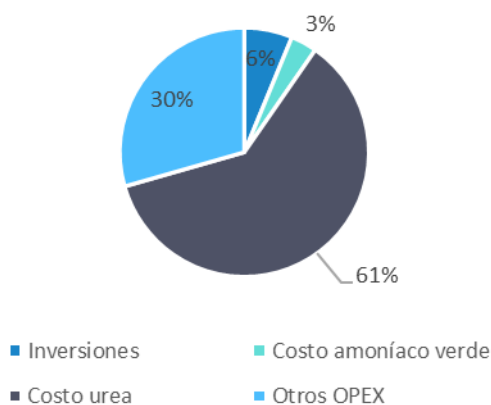
Suponiendo que el UFC 85 se produce con e-metanol combinado con urea gris, las estimaciones del costo nivelado de producción de UFC 85 sugieren que podría situarse dentro del rango superior de las referencias de precios internacionales para el producto convencional.

### 1.7.2 Melamina

**Caso base.** Para la producción de melamina en el caso base, se considera el uso tanto de amoníaco como urea de origen verde, con un costo de 760 USD/ton  $\text{NH}_3$  y 590 USD/ton urea.

Con estas consideraciones, se alcanza un costo de 1,472 USD/ ton melamina, ubicándose algo por encima del rango de los precios relevados en el mercado. El 61% del costo total se atribuye al costo de la urea verde; mientras que el costo operativo (OPEX) representa un 30%, principalmente por el alto consumo de energía eléctrica (Figura 20).

**Figura 20 Desglose de costos melamina**



Fuente: elaboración propia

Al igual que en el caso de estudio anterior, se destaca que el proceso de síntesis de melamina representa el eslabón final de la cadena de valor del hidrógeno verde. Además, requiere importantes inversiones aguas arriba: en el parque de generación renovable, en la producción del hidrógeno verde (electrolizadores), en el proceso de síntesis de amoníaco verde, y en el proceso de captura de CO<sub>2</sub> biogénico para producir urea verde.

**Análisis de sensibilidad.** Para analizar la relación del costo de melamina con los costos de sus insumos principales, urea y amoníaco, se realizó un análisis de sensibilidad. En este análisis, se varió el costo del amoníaco entre 300 y 1,000 USD por tonelada. El costo de la urea se estimó para cada valor de amoníaco.

Los valores obtenidos para el costo nivelado de producción de UFC 85 se presentan en la Tabla 5. Para costos de amoníaco mayores a 800 USD/ton, el costo nivelado de producción de melamina verde es superior a las referencias de precios internacionales para el producto convencional.

**Tabla 5 Costo nivelado de producción de melamina: Análisis de sensibilidad**

	Costos (USD/ton)							
	300	400	500	600	700	800	900	1000
Amoníaco								
Urea	232	309	387	464	541	619	696	773
Melamina	840	977	1114	1251	1387	1524	1661	1797

Fuente: elaboración propia

## 1.8 Oportunidades y barreras

En términos generales, los estudios de caso analizados podrían contribuir al desarrollo de la ruta para los derivados del hidrógeno, como el metanol y el amoníaco verdes, en el mediano y largo plazo, transformándolos en productos con valor agregado adicional y múltiples usos principalmente como aditivos en diversos sectores industriales. Los productos analizados (concentrado de urea-formaldehído, resinas UF y melamina) pueden clasificarse como productos químicos intermedios.

La definición de los productos y sus volúmenes de producción consideró las dimensiones del mercado potencial global (Europa) y regional (Argentina, Brasil y Paraguay), la estabilidad de estos compuestos, su logística de transporte y las capacidades de producción de estas plantas a nivel mundial. Para las escalas planteadas, estas plantas podrían impulsar el negocio de exportación del metanol para usos energéticos planteado en la hoja de ruta para Uruguay y contribuir al desarrollo de la ruta del amoníaco verde para su uso en fertilizantes en Uruguay.

El análisis económico realizado en esta etapa conceptual indica que los principales impulsores de costos residen en el costo de sus insumos principales: metanol verde, amoníaco verde y urea verde. Las estimaciones de costos nivelados de producción sugieren que todavía es necesario reducir el costo de dichos insumos para alcanzar la paridad con los precios de referencia (gris) internacionales, que, por otra parte, son volátiles y presentan una significativa dispersión.

La penetración de estos productos verdes en los mercados internacionales dependerá críticamente de la disposición a pagar de los potenciales compradores.

Las Tabla 6 y Tabla 7 presentan las principales oportunidades y barreras detectadas a partir de los análisis realizados.

**Tabla 6 Oportunidades**

Oportunidad / Aspecto destacado	Resinas UF / UFC 85	Melamina
<b>Énfasis en el rol de los derivados del H<sub>2</sub> verde en la industria</b>	Pone en relieve el rol del <b>metanol</b> verde como "building block" en la industria química	Pone en relieve el rol del <b>amoníaco</b> verde como "building block" en la industria química
<b>Temporalidad / Alineamiento con las prioridades nacionales para el desarrollo de la ruta del hidrógeno verde</b>	Las resinas requieren el desarrollo de la cadena de valor para la producción de metanol verde a partir de hidrógeno verde. El proyecto podría desarrollarse en el mediano plazo.	La melamina requiere el desarrollo de la ruta de la urea verde. De acuerdo a los lineamientos de la hoja de ruta del H <sub>2</sub> ; sugiere que el proyecto se podría desarrollar a más largo plazo.
<b>Complementariedad con el metanol como energético exportable</b>	Parte de la producción esperada de metanol verde para usos energéticos podría ser derivada para desarrollar la cadena de valor del formaldehído a resinas	No aplica
<b>Complementariedad con el desarrollo de la ruta de los fertilizantes verdes</b>	No es imprescindible desarrollar la cadena de valor de los fertilizantes verdes (urea). Pueden elaborarse con urea (gris o verde a futuro) importada ya que los procesos no necesariamente deben estar integrados	Son plantas que necesariamente deben integrarse a la producción de urea verde para reciclar los gases residuales (NH <sub>3</sub> + CO <sub>2</sub> )
<b>Mitigación GEI</b>	0.815 tonCO <sub>2eq</sub> /ton UFC 85 Para el volumen de producción planteado, esto representa un ahorro de emisiones equivalente a 1,240 autos/año	1.555 tonCO <sub>2eq</sub> /ton melamina Para el volumen de producción planteado, esto representa un ahorro de emisiones equivalente a 6,500 autos/año
<b>Transporte y logística portuaria</b>	El concentrado de urea formaldehído (UFC) es un material transparente y viscoso que contiene 60% de formaldehído, 25% de urea y 15% de agua. No se han relevado dificultades en cuanto a peligrosidad para su almacenamiento y transporte.	La melamina se fabrica y comercializa en forma de cristales. No se han relevado dificultades en cuanto a peligrosidad para su almacenamiento y transporte.



<b>Inversión requerida</b>	6 millones de USD (7,000 ton por año de UFC 85)	16 millones de USD (25,600 ton por año de melamina)
<b>Ingresos</b>	6.6 MUSD/año	35.8 MUSD/año
<b>Beneficios brutos de explotación</b>	0.8 MUSD/año	2.2 MUSD/año

**Tabla 7 Barreras**

<b>Barrera</b>	<b>Resinas UF / UFC 85</b>	<b>Melamina</b>
<b>Económicas y de mercado</b>	<p>El principal desafío es su costo que depende principalmente del costo de los insumos principales: metanol verde para las resinas / UFC y urea verde para la melamina.</p> <p>El rango de costos estimados sugiere que es necesario reducir el costo de los insumos verdes principales.</p>	
<b>Disposición a pagar de potenciales off takers</b>	<p>Las rutas al mercado y potenciales off takers aún inciertos. La dificultad para identificar off takers privados dispuestos a pagar un "premio verde" sería un barrera importante.</p>	
<b>Financiamiento</b>	<p>Complejo, a menos que se cuente con fondos concesionales</p>	
<b>Desarrollo de la cadena de valor</b>	<p>El proceso de síntesis de resinas representa el eslabón final de la cadena de valor del hidrógeno verde. Además, requiere importantes inversiones aguas arriba: en el parque de generación renovable, en la producción del hidrógeno verde (electrolizadores), en la planta de captura de CO<sub>2</sub> y en el proceso de síntesis de metanol, a las que también podría sumarse la cadena de valor para producir urea verde.</p>	<p>El proceso de síntesis de melamina representa el eslabón final de la cadena de valor del hidrógeno verde. Además, requiere importantes inversiones aguas arriba: en el parque de generación renovable, en la producción del hidrógeno verde (electrolizadores), en el proceso de síntesis de amoníaco verde, y en el proceso de captura de CO<sub>2</sub> biogénico para producir urea verde.</p>
<b>Estabilidad</b>	<p>Mientras que el concentrado UFC 85 puede colocarse en mercados transoceánicos (Europa), la resina UF debería suplir el mercado regional debido a su reducida estabilidad.</p>	<p>Estable</p>
<b>Toxicidad</b>	<p>La percepción negativa de las resinas de urea-formaldehído podría afectar demanda y uso en la industria. Los consumidores y reguladores</p>	<p>No se observa</p>

	están buscando alternativas más seguras y sostenibles. Esto lleva al desarrollo y adopción de resinas con menor contenido de formaldehído o libres de este.	
<b>Tecnología/Integración de cadena de valor</b>	El caso analizado representa aproximadamente un 30% del volumen de metanol que se podría producir a partir de la captura de CO <sub>2</sub> biogénico de una fuente mediana, del orden de 0.26 Mta de CO <sub>2</sub> .	La planta de melamina debe construirse integrada a la planta de producción de urea verde.

## 1.9 Recomendaciones de políticas públicas

Para propiciar una transición sostenible hacia una economía de bajas emisiones, se recomienda:

**Propiciar acuerdos marco con países importadores.** Las alianzas y acuerdos bilaterales con países importadores para propiciar la celebración de contratos de largo plazo con cierta garantía de precios son cruciales para viabilizar estos proyectos. Utilizar la red diplomática para promover los derivados del hidrógeno verde en mercados internacionales, facilitando negociaciones y fortaleciendo relaciones comerciales.

**Priorizar aplicaciones y temporalidad.** El desarrollo de la infraestructura de H<sub>2</sub> y sus derivados para la exportación exige el compromiso de grandes inversiones. La priorización de aplicaciones es muy relevante, con cuáles comenzar y a qué ritmo de sustitución. Si bien los casos de estudio analizados se posicionan hacia el final de la cadena de valor, pueden contribuir a la diversificación de derivados verdes, aprovechando sinergias con los usos del metanol como energético y del amoníaco para la producción de fertilizantes nitrogenados (urea).

**Facilitar la creación consorcios y asociaciones** que aporten conocimiento en las distintas partes de la cadena de valor y, en conjunto con organismos estatales, faciliten el financiamiento principalmente en las primeras etapas de desarrollo. Uno de los mayores retos es la falta de un ecosistema maduro de proveedores de equipos, socios tecnológicos, inversores y compradores que puedan apoyar la toma de decisiones para nuevas inversiones. Por esta razón, es relevante crear acuerdos, lo que puede significar una gran oportunidad de captura de valor por parte de estos actores.

**Promover actividades de I&D y capacitación de recursos humanos.** El desarrollo de proyectos de derivados no energéticos del hidrógeno requerirá nuevas calificaciones para llevarlos adelante y nuevos servicios de apoyo que podrían apoyarse en universidades para poder capacitar personal calificado.

**Promoción de un Entorno Regulador y Político Favorable.** Desarrollar y proveer un normativas claras e incentivos a la innovación (Uruguay ya posee programas en este sentido donde podrían incluirse este tipo de emprendimientos).





Torre Ejecutiva - Plaza Independencia 710, piso 7  
Tel: (+598 2) 150 int. 3421 y 3461  
Montevideo, Uruguay

[auci.gub.uy](http://auci.gub.uy)  
[cooperacion@auci.gub.uy](mailto:cooperacion@auci.gub.uy)

