

Biorrefinería del Trigo

Análisis integral de productos, subproductos, balances de masa y energía, costos CAPEX/OPEX y casos de estudio para ingenieros de procesos industriales.

INGENIERÍA DE PROCESOS

BIORREFINERÍA

TRITICUM AESTIVUM



Agenda

Estructura de la presentación para el análisis completo de la biorrefinería del trigo:

01

Concepto de Biorrefinería del Trigo

Definición, composición del grano y visión sistémica del proceso

02

Productos y Subproductos

Corrientes de valor: almidón, gluten, salvado, aceite de germen, fibra y biocombustibles

03

Balances de Masa y Energía

Cuantificación de flujos por tonelada de trigo procesado con ejemplos de cálculo

04

Análisis Económico CAPEX / OPEX

Inversión de capital, costos operativos y análisis de rentabilidad

05

Casos de Estudio y Bibliografía

Plantas de referencia mundial y fuentes técnicas especializadas

¿Qué es una Biorrefinería del Trigo?

Una **biorrefinería del trigo** es una instalación industrial integrada que convierte el grano de *Triticum aestivum* en múltiples corrientes de valor simultáneamente, optimizando el aprovechamiento de cada fracción anatómica del grano y minimizando residuos.

A diferencia de la molinería tradicional —centrada exclusivamente en harina panificable—, la biorrefinería extrae y refina **almidón nativo y modificado, gluten vital de trigo, aceite de germen, fibra dietética, arabinoxilanos y corrientes fermentables** para producir bioetanol, biogás y productos de alto valor añadido.

 El concepto sigue los principios de la **economía circular**: cero residuos, máxima valorización de cada fracción y cierre del ciclo energético interno.

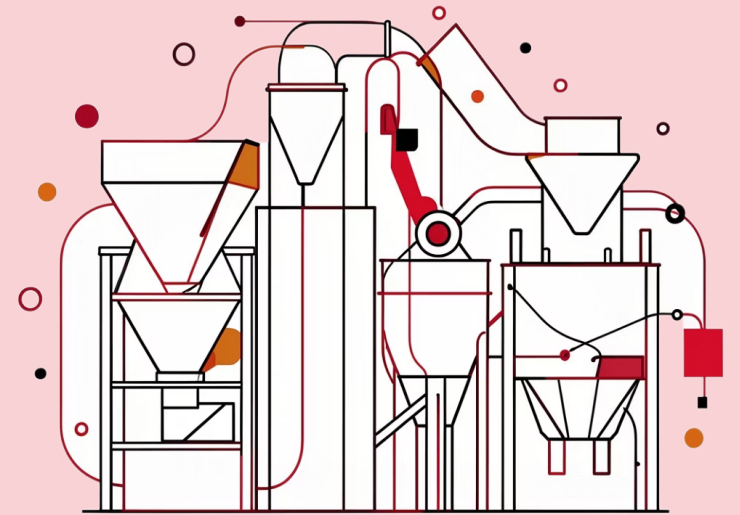
Composición media del grano de trigo

Fracción	% en peso seco
Almidón	60 – 70%
Proteínas (gluten)	10 – 15%
Fibra (salvado)	12 – 15%
Lípidos (germen)	2 – 3%
Humedad	12 – 14%
Cenizas / Otros	1 – 2%

Fuente: FAO, *Wheat: Its Production and Quality* (2022); Shewry & Hey, *J. Cereal Science* (2015).

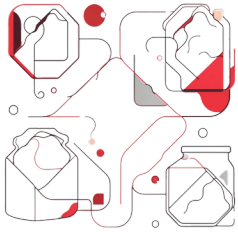
Productos y Subproductos del Procesamiento del Trigo

Cada fracción del grano genera corrientes de producto con mercados diferenciados y distintos niveles de valor añadido.



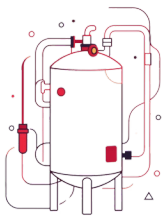
Mapa de Corrientes de Valor

Desde el grano limpio hasta el producto final, la biorrefinería genera seis grandes familias de corrientes:



Almidón Nativo y Modificado

Almidón A (granos grandes, $\geq 10 \mu\text{m}$) y almidón B (granos pequeños, $< 10 \mu\text{m}$). Se vende nativo o se modifica (acetilado, oxidado, fosfatado) para alimentación, papel y adhesivos.



Bioetanol

Fermentación alcohólica de jarabes de glucosa derivados del almidón B y aguas de proceso. Rendimiento teórico: $0,51 \text{ kg EtOH} / \text{kg glucosa}$.



Gluten Vital de Trigo (VWG)

Proteína viscoelástica con 75–80% de proteína en base seca. Se usa en panadería industrial, análogos cárnicos y piensos de alto valor proteico.



Biogás / Biometano

Digestión anaerobia de vinaza, aguas de lavado y fracción de almidón no recuperada. Potencial: $350\text{--}400 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4 / \text{t SV}$. Cubre hasta el 40% de la demanda térmica de planta.



Salvado y Fibra

Pericarpio, testa y aleurona. Rico en arabinoxilanos (15–30% BS), fitatos y vitaminas B. Mercado en alimentación funcional, suplementos y piensos.



Aceite de Germen

Extracción hexánica o por prensado en frío. Rico en vitamina E (tocoferoles) y ácidos grasos insaturados (linoleico 55%). Mercado cosmético y nutracéutico.

Balance de Masa: Base 1.000 kg de Trigo Limpio

A continuación se presenta el balance de masa simplificado para una planta de biorrefinería húmeda de trigo. Todos los valores están referidos a **1.000 kg de trigo limpio** con 14% de humedad.

Corriente de Salida	kg / t trigo	% masa entrada
Almidón A (humedad 10%)	490	49,0%
Almidón B / jarabe glucosa	55	5,5%
Gluten vital (humedad 8%)	85	8,5%
Salvado grueso + fino	220	22,0%
Germen (prensado)	18	1,8%
Aceite de germen	7	0,7%
Harina segundas	45	4,5%
Aguas proceso + vinaza	Recirculación	—
TOTAL RECUPERADO	920	92,0%
Pérdidas (polvo, purgas)	80	8,0%

❏ Los 80 kg de pérdidas incluyen polvos de ciclones y purgas de aguas residuales tratadas en PTAR interna.

Ejemplo de Cálculo — Rendimiento de Almidón A

Almidón teórico en trigo: 650 kg/t (65%). Factor de recuperación de proceso: 0,75. **Almidón A recuperado = 650 × 0,75 = 487,5 ≈ 490 kg/t.**

Factor de recuperación incluye: pérdidas en centrifugación (8%), arrastre en gluten (5%) y efluentes (12%).

Ref.: Meuser et al., *Starch/Stärke* (2010); Smith, *Industrial Processing of Wheat*, CRC Press (2019).

Balance de Energía: Demanda Térmica y Eléctrica

El balance energético se estructura en tres sistemas: **proceso mecánico** (molienda, centrifugación), **proceso térmico** (secado, esterilización) y **recuperación interna** (biogás, vapor de retorno).

Demandas energéticas por tonelada de trigo

Sistema	Energía (GJ/t trigo)
Molienda húmeda (motores)	0,30 – 0,45 GJ/t
Centrifugación y separación	0,10 – 0,15 GJ/t
Secado de almidón (spray / anillo)	0,80 – 1,10 GJ/t
Secado de gluten (anillo)	0,50 – 0,70 GJ/t
Refrigeración de proceso	0,05 – 0,10 GJ/t
Total demanda bruta	1,75 – 2,50 GJ/t
Recuperación por biogás interno	–0,60 – –0,90 GJ/t
Demanda neta	1,15 – 1,60 GJ/t

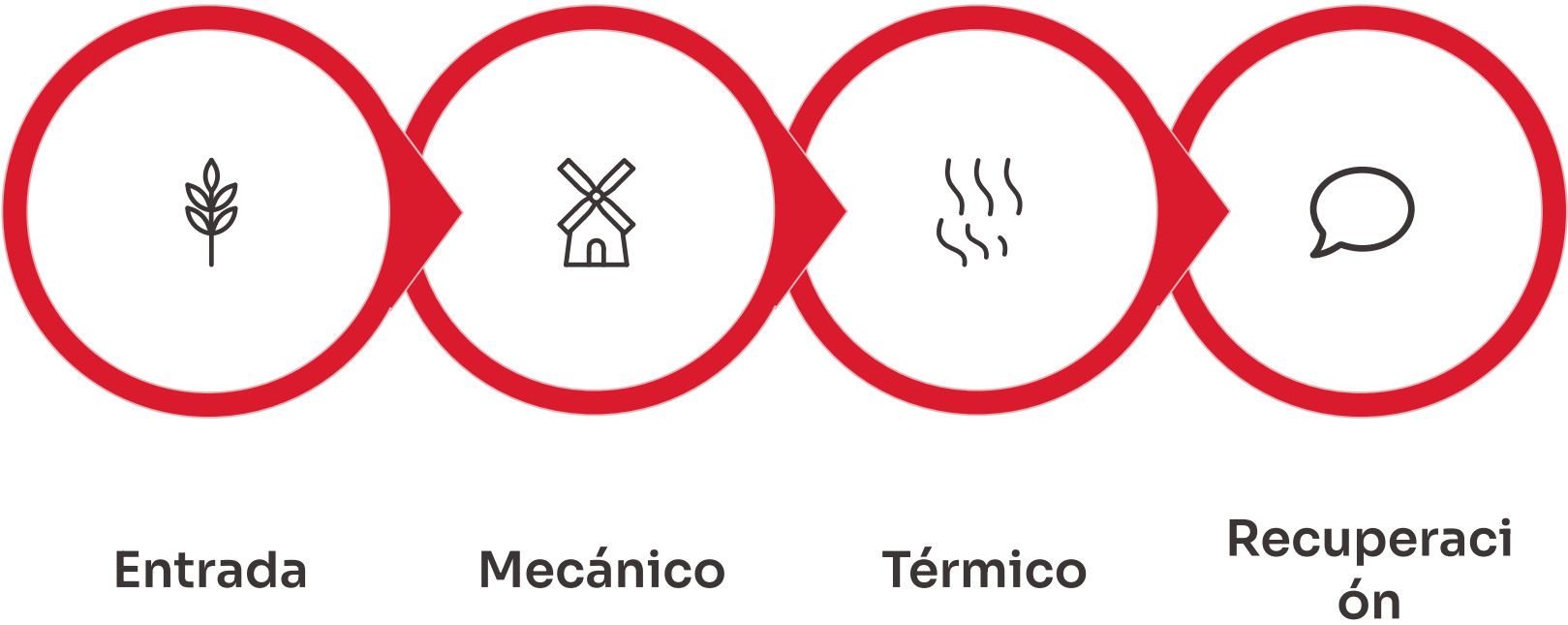
Ejemplo de Cálculo — Balance Térmico del Secado de Almidón

Datos: 490 kg almidón A a 40% humedad → secar a 10% humedad.
Masa agua a evaporar: $490 \times (0,40 - 0,10) / (1 - 0,10) = \mathbf{163\text{ kg H}_2\text{O}}$.

Calor requerido: $Q = m \times \lambda = 163\text{ kg} \times 2.257\text{ kJ/kg} = \mathbf{368\text{ MJ}}$ (sin pérdidas). Con eficiencia de secador de anillo $\eta = 65\%$: $Q_{\text{real}} = 368 / 0,65 = \mathbf{566\text{ MJ / t trigo}}$.

✔ La integración de calor de la vinaza ($T \approx 75\text{ °C}$) puede recuperar hasta 80 MJ/t, reduciendo la demanda neta del secador en un **14%**.

Fuente: Haase et al., *Bioresource Technology* (2012); Audsley & Sell, *Biosystems Engineering* (2019).



Análisis Económico: CAPEX

La inversión de capital (**Capital Expenditure, CAPEX**) para una biorrefinería de trigo se estructura por áreas de proceso. Los valores de referencia corresponden a plantas de **200–500 t/día** de capacidad en Europa occidental (€ de 2023).

Área 100 — Recepción, Limpieza y Almacenamiento

Silos, elevadores de cangilones, separadores magnéticos y densimétricos, básculas certificadas y sistemas de ventilación. **CAPEX referencia: 1,5 – 2,5 M€ por 200 t/día.** Factor de escala (exponente 0,65) para otras capacidades.

Área 200 — Molienda Húmeda y Separación Gluten/Almidón

Lavadora de masa (dough washing), centrifugas de disco Alfa Laval / GEA, hidrocyclones de almidón (batería de 14 etapas). **CAPEX referencia: 8 – 14 M€ por 200 t/día.** Representa el 40–45% del CAPEX total.

Área 300 — Secado y Acondicionamiento de Productos

Secador de anillo para almidón, secador de choque térmico para gluten vital, enfriadores de lecho fluidizado. **CAPEX referencia: 4 – 7 M€ por 200 t/día.** Incluye intercambiadores de calor y sistemas de recuperación energética.

Área 400 — Fermentación y Producción de Bioetanol

Tanques de sacarificación, fermentadores de 500 m³, columna de destilación azeotrópica, deshidratación molecular con tamices. **CAPEX referencia: 5 – 9 M€ por 200 t/día** de trigo equivalente (escala 50 t almidón B/día).

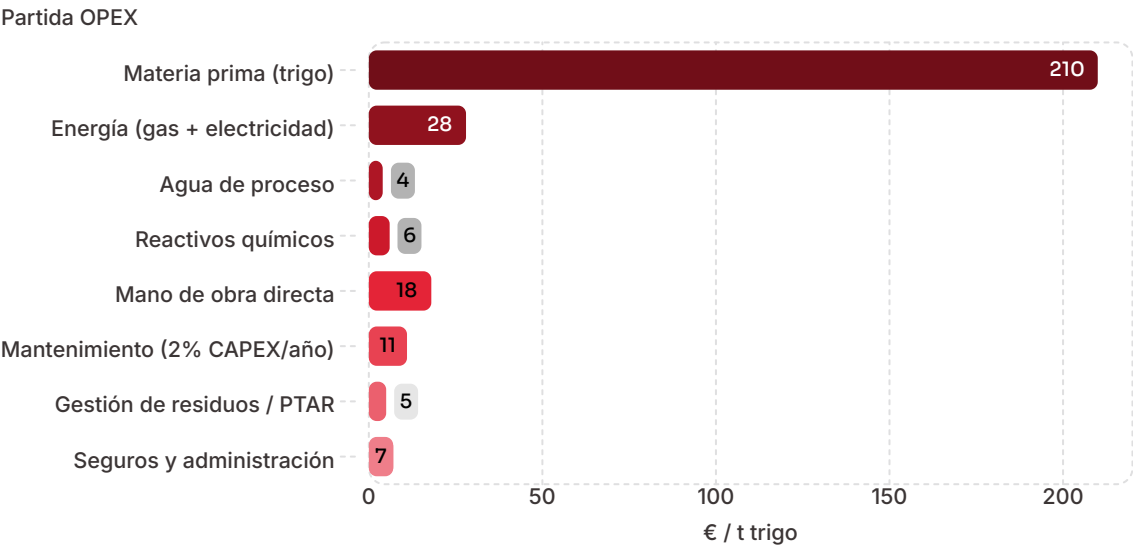
Área 500 — Digestión Anaerobia y Biogás

Reactor UASB o CSTR, depuración de biogás (membranas o PSA para biometano), unidad de cogeneración (CHP). **CAPEX referencia: 2 – 4 M€.** TIR mejorado por venta de créditos de carbono (ETS EU).

⚠ **CAPEX total estimado (planta 200 t/día): 22 – 38 M€.** Factor de contingencia recomendado: +15–20%. Fuentes: Peters & Timmerhaus, *Plant Design and Economics for Chemical Engineers* (2017); Eurostat, ECOINVENT v3.9.

Análisis Económico: OPEX

Los costos operativos (**OPEX**) determinan la rentabilidad diaria de la planta. Se expresan por tonelada de trigo procesado (€/t trigo, base 2023, planta 200 t/día, 330 días/año operación efectiva).



Estructura de Ingresos (€/t trigo)

Producto	Precio ref.	Ingreso
Almidón A nativo	350 €/t	171 €/t trigo
Gluten vital (VWG)	900 €/t	76 €/t trigo
Salvado premium	150 €/t	33 €/t trigo
Aceite de germen	2.500 €/t	17 €/t trigo
Bioetanol (95%)	0,65 €/L	18 €/t trigo
Biometano (red)	0,80 €/Nm³	12 €/t trigo
TOTAL INGRESOS	—	327 €/t trigo

✔ **Margen bruto estimado:** 327 – 289 = **38 €/t trigo**
(OPEX sin amortización). Con amortización 15 años:
~24 €/t. EBITDA margin ≈ 12–14%.

Casos de Estudio: Plantas de Referencia Mundial

Los siguientes casos ilustran configuraciones reales de biorrefinerías de trigo a escala industrial, con datos de operación y lecciones aprendidas:

Caso 1 — Syral / Tereos (Francia, Lillebonne)

Capacidad: 1.200 t trigo/día. **Productos principales:** almidón nativo/modificado, glucosa, bioetanol (150.000 t/año), gluten vital y DDGS. Integración energética con cogeneración interna (vapor 40 bar). **Lección clave:** la venta de bioetanol bajo directiva RED II cubre el 22% de ingresos totales, pero el gluten vital representa el mayor margen unitario.

Caso 2 — Cargill Starch (Bélgica, Vilvoorde)

Capacidad: 500 t trigo/día. **Productos:** almidón para papel (70% de producción), almidón modificado alimentario y VWG. **CAPEX total:** ~120 M€ (inversión 2018–2021). **Lección clave:** la diversificación hacia almidón funcional para papel (adhesivos y recubrimientos) redujo la exposición al mercado alimentario y mejoró el margen EBITDA en 4 puntos porcentuales.

Caso 3 — Harimsa / Harineras Villamayor (España)

Capacidad: 200 t trigo/día. **Configuración:** molinería seca integrada con línea de gluten vital y salvado funcional. Sin fermentación. **CAPEX:** 18 M€. **Lección clave:** la biorrefinería seca (sin molienda húmeda) reduce el CAPEX en un 40% pero limita la pureza del almidón (95% vs. 99,5%) y excluye la corriente de bioetanol.

Caso 4 — Roquette Frères (Francia, Lestrem)

Capacidad: 2.000 t trigo+maíz/día (multimateria prima). **Productos destacados:** maltodextrinas, ciclodextrinas, almidón resistente RS2/RS4 y proteína de trigo hidrolizada. **I+D:** 3% de ventas reinvertido en nuevos productos de alto valor (arabinosilanos, AXOS para prebióticos). Referencia en integración de biorrefinería avanzada con química fina.

Ejemplo de Cálculo Completo: Dimensionamiento de Hidrocyclones de Almidón

El sistema de hidrocyclones es el equipo central en la separación almidón A / almidón B. Se presenta un ejemplo de dimensionamiento para la batería primaria.

Datos de diseño

- Caudal de suspensión de almidón: 25 m³/h
- Concentración de entrada: 22°Bé ($\approx$ 200 g almidón/L)
- Tamaño de corte: 10 μ m (separar almidón A de B)
- Modelo: hidrocyclón DSM Krebs 50 mm
- Presión diferencial: $\Delta P = 2,5$ bar

Caudal por unidad (Krebs 50 mm)

Q_unitario = 0,8 m³/h (dato de catálogo a $\Delta P = 2,5$ bar).

Número de unidades = Q_total / Q_unitario = 25 / 0,8 = 31,25 $\rightarrow$ 32 unidades (redondeo al alza + 10% reserva = **36 unidades en operación**).

- ❑ Se recomienda una batería de 14 etapas en contracorriente (counter-current wash) para alcanzar pureza $\geq 99,5\%$ en almidón A. Ref.: Meuser, *Starch/Stärke* 62 (2010), 1–12.

Consumo energético de la batería

Potencia de bomba de alimentación:

$$P = (Q \times \Delta P) / \eta_{\text{bomba}} = (25/3.600 \text{ m}^3/\text{s} \times 250.000 \text{ Pa}) / 0,72 = \mathbf{2.430}$$

W $\approx$ 2,4 kW

Potencia total batería 14 etapas: $2,4 \times 14 = \mathbf{33,6 \text{ kW}}$

Consumo específico: $33,6 \text{ kW} / (25 \text{ m}^3/\text{h} \times 200 \text{ kg}/\text{m}^3) = \mathbf{0,0067}$
kWh/kg almidón

Eficiencia de separación (Ecuación de Rietema)

$$Eu = \frac{2\Delta P}{\rho_L \cdot \bar{v}^2} = \frac{2 \times 2,5 \times 10^5}{1070 \times 5,6^2} \approx 15$$

Número de Euler $Eu \approx 15$, típico de hidrocyclones de alta eficiencia para almidón. Ref.: Rietema, *Chemical Engineering Science* (1961).

Indicadores de Sostenibilidad y Análisis de Ciclo de Vida

La biorrefinería del trigo debe evaluarse no solo económicamente, sino también mediante indicadores de huella ambiental (ACV, ISO 14044).

0,82

kg CO₂eq / kg almidón

Huella de carbono del almidón nativo de trigo vs. 1,1 kg CO₂eq/kg para almidón de maíz importado (ecoinvent v3.9)

65%

Reducción GEI vs. Gasolina

Reducción de gases de efecto invernadero del bioetanol de trigo frente a gasolina fósil, según metodología RED II (Directiva UE 2018/2001)

40%

Autosuficiencia Térmica

Porcentaje de la demanda térmica de planta cubierto por combustión de biogás producido en digestión anaerobia de vinaza y efluentes

12 L

Agua / kg almidón

Consumo hídrico neto con recirculación optimizada. Sin recirculación: 25–30 L/kg. La optimización reduce la carga en PTAR interna un 55%

Bibliografía y Fuentes Técnicas

Referencias seleccionadas para profundización técnica, ordenadas por área temática:

Libros y Manuales de Referencia

- Peters, M.S. & Timmerhaus, K.D.** (2017). *Plant Design and Economics for Chemical Engineers*, 5ª ed. McGraw-Hill. — CAPEX/OPEX y factores de escala.
- Smith, J.E.** (2019). *Industrial Processing of Wheat*. CRC Press. — Tecnología de molienda húmeda y balances de masa.
- Meuser, F. et al.** (2010). Starch separation processes. *Starch/Stärke*, 62(1), 1–12. — Hidrocyclones, pureza y rendimiento.
- Shewry, P.R. & Hey, S.J.** (2015). The contribution of wheat to human diet and health. *Food and Energy Security*, 4(3), 178–202.
- Rietema, K.** (1961). Performance and design of hydrocyclones. *Chemical Engineering Science*, 15(3–4), 298–325. — Ecuación de Euler para separación.

Artículos Científicos y Normativa

- Haase, N.U. et al.** (2012). Energy balance of bioethanol production from wheat starch and wheat whole meal. *Bioresource Technology*, 106, 168–174.
- Audsley, E. & Sell, J.** (2019). Life cycle assessment of wheat biorefinery. *Biosystems Engineering*, 185, 12–28.
- Directiva UE 2018/2001 (RED II)** — Criterios de sostenibilidad para biocombustibles y reducción de emisiones GEI.
- ECOINVENT v3.9** (2023). Base de datos de inventario de ciclo de vida. Swiss Centre for Life Cycle Inventories.
- FAO** (2022). *Wheat: Its Production and Quality*. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Roma.

 Todas las cifras económicas deben actualizarse con índices CEPCI (Chemical Engineering Plant Cost Index) o Eurostat para el año de ejecución del proyecto. Los balances de masa deben validarse con ensayos piloto (escala 100–500 kg/h) antes del diseño básico (FEED).