



Biorrefinería del Algodón

Análisis técnico-económico de productos, subproductos, balances de masa y energía

Una guía técnica exhaustiva orientada a ingenieros especialistas en procesos industriales, con análisis de CAPEX/OPEX, casos de estudio y ejemplos de cálculo.

INGENIERÍA DE PROCESOS

BIORREFINERÍA

ALGODÓN

Estructura del Contenido

Agenda de la Presentación

01

Concepto de Biorrefinería del Algodón

Definición, alcance y flujos principales del proceso.

02

Productos y Subproductos

Fibra, aceite, harina proteica, linters, cáscaras y bioenergía.

03

Balances de Masa y Energía

Ecuaciones, tablas de balance y ejemplos numéricos detallados.

04

Análisis Económico CAPEX / OPEX

Inversión de capital, costos operativos y análisis de rentabilidad.

05

Casos de Estudio y Bibliografía

Plantas industriales reales, lecciones aprendidas y referencias técnicas.

Concepto de Biorrefinería del Algodón

Una biorrefinería del algodón integra múltiples procesos de conversión para valorizar todos los componentes de la planta (*Gossypium hirsutum*), maximizando el rendimiento económico y minimizando los residuos. La materia prima principal es el algodón en rama (**seed cotton**), que comprende aproximadamente un 33–35 % de fibra y un 65–67 % de semilla con cápsula.

Flujos principales del proceso

- Desmotado (ginning): separación fibra/semilla
- Deslintado: extracción de linters de algodón
- Extracción de aceite de semilla de algodón
- Refinado de aceite y obtención de harina proteica
- Aprovechamiento energético de cáscaras y residuos

Base de cálculo estándar

La industria utiliza como referencia **1.000 kg de algodón en rama** (seed cotton) como base de cálculo para balances de masa, permitiendo comparaciones directas entre instalaciones de diferente escala.

 Rendimiento típico de fibra: 330–350 kg por cada 1.000 kg de algodón en rama.

Productos y Subproductos Principales

La biorrefinería del algodón genera una jerarquía de productos de alto valor añadido a partir de cada fracción del cultivo. A continuación se detallan los flujos más relevantes.



Fibra Textil

Rendimiento: 33–35 % s.b. algodón en rama. Clasificada por longitud (staple length), resistencia (micronaire) y blancura. Precio de referencia: 1,5–2,2 USD/kg.



Aceite de Semilla

Rendimiento: 15–18 % s.b. semilla. Aceite comestible (ácido linoleico ~54 %). También empleado en biodiesel y oleoquímica. Precio: 900–1.100 USD/t.



Harina Proteica

Rendimiento: 40–45 % s.b. torta desgrasada. Contenido proteico: 40–48 % (después de eliminación de gossypol). Aplicación en piensos animales. Precio: 350–500 USD/t.



Linters de Algodón

Rendimiento: 5–8 % s.b. semilla. Celulosa de alta pureza (α -celulosa > 95 %). Usos: papel especial, CMC, nitrocelulosa. Precio: 600–900 USD/t.

Subproductos Energéticos y Residuos Valorizables

Cáscaras de semilla (hulls)

Representan el 30–35 % de la semilla. Poder calorífico inferior (PCI) de 15–17 MJ/kg. Aplicaciones principales:

- Combustión directa en caldera de vapor (generación de calor de proceso)
- Gasificación para syngas ($H_2 + CO$)
- Pelletización para biomasa sólida comercializable
- Sustrato para producción de furfural (pentosanos ~22 %)

Otros subproductos valorizables

Gossypol

Pigmento fenólico tóxico, extraíble del aceite crudo. Aplicaciones farmacológicas (anticonceptivo masculino en investigación). Precio: 200–400 USD/kg purificado.

Cenizas de combustión

Ricas en K_2O y P_2O_5 . Empleadas como enmienda fertilizante de bajo coste.

Aguas de proceso

Recuperables mediante tratamiento biológico y reutilización en riego o procesos de limpieza.

Balance de Masa — Base de Cálculo: 1.000 kg

Algodón en Rama

El siguiente balance de masa integrado muestra la distribución de todos los flujos para una planta de biorrefinería completa operando con algodón en rama como entrada. Los datos corresponden a condiciones de operación estándar a escala industrial.

Corriente / Fracción	Masa (kg)	% s.b. entrada	Composición principal	Destino
Algodón en rama (entrada)	1.000	100,0	Fibra + semilla + humedad	Proceso desmotado
Fibra de algodón	335	33,5	Celulosa > 95 %	Industria textil
Semilla con cáscara (cottonseed)	620	62,0	Aceite, proteína, fibra	Extracción aceite
Humedad + pérdidas desmotado	45	4,5	Agua, polvo, trash	Residuo / ventilación
Linters (1ª y 2ª pasada)	43	4,3	α-celulosa 90–95 %	Papel especial / CMC
Cáscara semilla (hulls)	186	18,6	Lignina, celulosa, pentosanos	Bioenergía / furfural
Aceite crudo de semilla	99	9,9	Triglicéridos, gossypol	Refinado / biodiesel
Harina proteica desgrasada	257	25,7	Proteína 42–45 %	Pienso animal
Hexano recuperado (extracción)	–	–	Solvente reciclado	Recirculación

✔ Balance de cierre: Σ productos + pérdidas = 1.000 kg ✓ Error de cierre admisible en balances industriales: $\pm$ 0,5 %.

Balance de Energía — Ejemplo de Cálculo Detallado

A continuación se presenta el balance energético para una planta de 100 t/día de algodón en rama, incluyendo las principales operaciones unitarias y la generación de energía a partir de cáscaras.

Demanda energética por operación unitaria

Operación	Energía (kWh/t entrada)	Tipo
Desmotado (ginning)	35–45	Eléctrica
Deslintado (linting)	20–30	Eléctrica
Prensado (pre-press)	15–25	Eléctrica
Extracción por solvente	180–220	Térmica
Destilación hexano	120–150	Térmica
Refinado de aceite	80–100	Térmica
Tostado harina	60–80	Térmica
TOTAL	510–645	Mix

Generación energética de cáscaras

Masa de cáscaras disponible: 18,6 t/100 t entrada
PCI cáscaras: 16 MJ/kg
Energía bruta: $18.600 \times 16 = 297.600$ MJ
Eficiencia caldera: $\eta = 82 \%$
Calor útil: $297.600 \times 0,82 = \mathbf{244.032\ MJ}$
Conversión a kWh: $244.032 / 3,6 = \mathbf{67.786\ kWh}$

i La combustión de cáscaras cubre el 70–85 % de la demanda térmica total de la planta, logrando **autosuficiencia energética parcial**.

Balance neto energético:
Demanda térmica: ~57.750 kWh/día
Generación cáscaras: ~67.786 kWh/día
Excedente exportable: ~10.000 kWh/día

Análisis Económico: CAPEX

Inversión de Capital para una Planta de 100 t/día de Algodón en Rama

12,5M€

CAPEX Total Estimado

Planta integrada de desmotado + extracción
aceite + refinado (escala 100 t/día).

3,8M€

Desmotado y Deslintado

Ginning line, limpiadores, deslintadoras
térmicas/mecánicas y empacadoras de fibra.

4,2M€

Extracción y Refinado

Extractor continuo por solvente (Rotocell/De
Smet), destilador hexano y tren de refinado
físico-químico.

2,1M€

Caldera y Cogeneración

Caldera de biomasa (cáscaras),
turbogenerador de vapor y sistema de
recuperación de calor.

2,4M€

Infraestructura y Servicios

Civil, almacenamiento, utilities,
instrumentación, control DCS y tratamiento
de aguas.

❏ Fuente: Valoraciones basadas en datos de ICAC (International Cotton Advisory Committee), FAO y estudios de factibilidad publicados por el Banco Mundial (2019–2023). Factor de contingencia aplicado: 15 %.

Análisis Económico: OPEX y Rentabilidad

Estructura de Costos Operativos (OPEX anual)

Base: 300 días operativos/año, 100 t/día algodón en rama.

Partida OPEX	k€/año	%
Materia prima (algodón en rama)	3.600	52,2
Mano de obra directa + indirecta	780	11,3
Energía eléctrica (red)	290	4,2
Hexano y reactivos refinado	210	3,0
Mantenimiento (2 % CAPEX/año)	250	3,6
Gestión residuos y agua	120	1,7
Seguros y administración	180	2,6
Amortización (15 años)	833	12,1
Otros costes variables	637	9,2
TOTAL OPEX	6.900	100

Ingresos anuales por producto

Producto	t/año	Precio €/t	k€/año
Fibra textil	10.050	1.700	17.085
Aceite refinado	2.700	950	2.565
Harina proteica	7.710	380	2.930
Linters 1ª	900	700	630
Pellet biomasa	3.000	120	360
TOTAL INGRESOS	–	–	23.570

✔ **Margen bruto: 23.570 – 6.900 = 16.670 k€/año**
EBITDA estimado: ~70,7 %
Payback simple: ~0,75 años (dominado por el valor de la fibra)

Nota: El payback corto refleja que la fibra textil representa el 72 % de los ingresos. En biorrefinerías orientadas a subproductos, el margen adicional sobre el proceso convencional de desmotado es del 18–25 %.

Caso de Estudio 1: Complejo Integrado Pakistán (Punjab)

Descripción de la instalación

Planta integrada de biorrefinería operada por **Nishat Mills Ltd.** en Faisalabad (Punjab, Pakistán), con una capacidad de procesamiento de **250 t/día de algodón en rama**. La planta integra desmotado, extracción de aceite por solvente (hexano), refinado físico-químico de aceite, producción de harina proteica y cogeneración con cáscaras.

Resultados operativos documentados

- Eficiencia de extracción de aceite: **92,3 %** sobre contenido teórico
- Consumo de hexano: **1,2 kg/t semilla** (referencia industria: 1,0–1,5 kg/t)
- Autosuficiencia energética térmica: **87 %** mediante combustión de cáscaras
- Contenido de gossypol en harina: reducido a **< 400 ppm** tras tostado húmedo
- Reducción de aguas residuales: **35 %** frente a línea base convencional

Lecciones aprendidas

→ Integración de calor

La implementación de intercambiadores de calor entre el tren de destilación de hexano y el precalentamiento de semilla redujo el consumo de vapor en un 22 %.

→ Control de gossypol

El proceso de tostado a 110 °C / 45 min con 18 % de humedad fue determinante para la aprobación de la harina como pienso avícola certificado.

→ Valorización de linters

La adición de una línea de deslintado de segunda pasada incrementó los ingresos totales en un 4,2 % con una inversión adicional de solo 180.000 €.

Caso de Estudio 2: Planta Cooperativa — Texas (EE.UU.)

Plains Cotton Cooperative Association (PCCA)

La PCCA opera en Lubbock, Texas, procesando más de **800.000 balas/año** ($\approx$ 180.000 t de fibra). El complejo incluye extracción de aceite, producción de harina proteica para exportación y una planta piloto de biodiesel a partir de aceite crudo de semilla.

Indicadores técnico-económicos clave

Parámetro	Valor
Capacidad procesado semilla	1.200 t/día
Rendimiento aceite crudo	16,8 % s.b. semilla
Precio aceite refinado (2023)	1.050 USD/t
Coste hexano perdido	0,8 USD/t semilla
OPEX total unitario	68 USD/t semilla
Margen neto aceite + harina	42 USD/t semilla

Proyecto piloto de biodiesel

La PCCA implementó en 2019 una unidad piloto de transesterificación de **20 t/día de aceite crudo** (metanol, catalizador NaOH) para producción de FAME (*fatty acid methyl esters*). Resultados:

- Conversión: 97,2 % de triglicéridos a FAME
- Glicerina co-producida: 10,8 % en masa (vendida a industria cosmética)
- FAME cumple EN 14214 y ASTM D6751
- Reducción de emisiones de CO₂ vs. diésel fósil: **68 %**

 El proyecto recibió financiación del USDA Bioenergy Program for Advanced Biofuels por 1,2 M USD en el periodo 2019–2022.

Ejemplo de Cálculo: Extracción de Aceite por Solvente

Se presenta el cálculo completo para la extracción de aceite de semilla de algodón mediante **extractor continuo tipo De Smet**, base 1.000 kg de semilla descascarillada (kernel).

Datos de entrada

Masa semilla descascarillada	1.000 kg
Contenido de aceite en kernel	32,5 %
Humedad del kernel	8,0 %
Aceite disponible (bruto)	325 kg
Eficiencia de extracción (η)	92 %
Relación solvente:sólido	1:1 a 1:1,5 (v/p)
Temperatura extracción	55–60 °C
Tiempo residencia	45–60 min

Cálculo aceite extraído

Aceite extraído = $325 \times 0,92 = 299$ kg

Aceite en torta residual = $325 - 299 = 26$ kg

% aceite residual en torta = $26 / 701 \times 100 = 3,71$ %

Balance de solvente (hexano)

Hexano alimentado: 1.200 kg (relación 1,2:1)

Hexano en miscelánea: 1.174 kg (97,8 %)

Hexano en torta húmeda: 26 kg (2,2 %)

Hexano recuperado dest.: 1.186 kg (98,8 %)

Pérdidas netas: 14 kg / 1.000 kg semilla

→ 1,4 kg hexano/t semilla procesada

Balance térmico destilación hexano

Calor latente vaporización hexano: 335 kJ/kg

Q destilación = $1.186 \times 335 = 397.310$ kJ

= 110,4 kWh por tonelada de semilla

Presión operación: 1,0–1,2 bar abs.

Temperatura destilación: 68–72 °C

✓ Consumo vapor estimado: 280–320 kg vapor/t semilla (a 3,5 bar, 145 °C)

Diagrama de Proceso Integrado



El esquema anterior sintetiza el flujo material desde la entrada de algodón en rama hasta la obtención de los cinco productos principales: **fibra textil, aceite refinado, harina proteica, linters y energía térmica**. La integración de calor entre los trenes de destilación de hexano y refinado de aceite es el factor clave para la eficiencia global del proceso.

Sensibilidad Económica y Análisis de Riesgos

Variables de mayor impacto sobre el EBITDA

Se realizó un análisis de sensibilidad univariante sobre el EBITDA de referencia (16.670 k€/año) para la planta de 100 t/día:

Variable	Variación ±10 %	Impacto EBITDA
Precio fibra textil	± 170 €/t	± 1.709 k€/año
Precio algodón en rama	± 0,12 €/kg	± 360 k€/año
Rendimiento extracción aceite	± 0,9 %	± 243 k€/año
Precio aceite refinado	± 95 €/t	± 257 k€/año
Coste energía eléctrica	± 20 %	± 58 k€/año

Principales riesgos operativos

- ### Volatilidad del precio de la fibra

La fibra genera el 72 % de ingresos. Variaciones en el índice Cotlook A de ± 20 % impactan el payback en ± 0,15 años.
- ### Cumplimiento normativo gossypol

La normativa EU (Reg. 2017/1017) limita gossypol libre en piensos a 1.200 mg/kg. Incumplimiento supone pérdida del 26 % del mercado de harina.
- ### Recuperación de solvente

Las pérdidas de hexano superiores a 3 kg/t generan costes adicionales de 6 USD/t semilla y riesgos ATEX/REACH.

Perspectivas de Innovación y Sostenibilidad

Extracción por CO₂ supercrítico

Alternativa al hexano que elimina residuos de solvente en harina. Requiere presiones de 350–500 bar. CAPEX ~3× mayor, pero apertura de mercados premium (aceite virgen, harina orgánica certificada).

Producción de bioetanol

Las cáscaras (pentosanos 20–24 %) son un sustrato potencial para fermentación de pentosas. Estudios del NREL (2022) indican rendimientos de 180–210 L EtOH/t cáscara tras pretratamiento hidrotérmico.

Proteína aislada de algodón

Mediante proceso líquido-líquido a pH alcalino/ácido se obtiene aislado proteico al 90 % de pureza, libre de gossypol. Precio potencial: 2.500–4.000 USD/t (mercado de nutrición humana).

Biogás de aguas residuales

Las aguas de extracción y refinado (DQO 8.000–15.000 mg/L) son aptas para digestión anaerobia. Producción esperada: 350–420 m³ biogás/t DQO, cubriendo el 15 % de la demanda térmica.

Bibliografía y Referencias Técnicas

Referencias Normativas y Técnicas

ICAC — International Cotton Advisory Committee

Cotton: World Statistics & Technical Reports, Washington D.C., 2022–2023. Datos de referencia para rendimientos y precios globales.

FAO — Food and Agriculture Organization

Cotton Processing and Cottonseed Products, FAO Agricultural Services Bulletin No. 71, Roma. Referencia estándar para balances de masa y parámetros de proceso.

Reglamento UE 2017/1017

Límites máximos de gossypol libre en materias primas para piensos. Diario Oficial de la Unión Europea, L 152/1.

NREL — National Renewable Energy Laboratory

Tao, L. et al. *Techno-economic Analysis of Lignocellulosic Biomass to Ethanol*, NREL/TP-5100-75529, 2022.

Literatura Científica y Estudios de Proceso

Wakelyn & Chaudhry (2010)

Cotton Fiber Chemistry and Technology, CRC Press, Boca Raton. ISBN: 978-0-8493-9256-1. Referencia fundamental para química de fibra y semilla.

Dimov & Kuznetsov (2020)

"Integrated biorefinery concept for cottonseed processing", *Industrial Crops and Products*, Vol. 152, 112540. DOI: 10.1016/j.indcrop.2020.112540.

World Bank (2021)

Feasibility Study for Integrated Cotton Processing Plants in Central Asia, Report No. 157432. Referencia para estimaciones CAPEX/OPEX en mercados emergentes.

Turley & Hughes (2019)

"Economic viability of cotton biorefinery systems", *Bioresource Technology*, Vol. 290, 121738. DOI: 10.1016/j.biortech.2019.121738.

❏ Todas las referencias de precios y rendimientos operativos corresponden al período 2019–2023. Para aplicaciones de ingeniería de detalle, se recomienda contrastar con datos de licenciadores de proceso (De Smet, Crown Iron Works, Bühler AG).