

Biorrefinería de la Remolacha

Un Futuro Sostenible y Rentable — Análisis técnico-económico para ingenieros de procesos

INGENIERÍA DE PROCESOS

ANÁLISIS CAPEX / OPEX

BIORREFINERÍAS



El Potencial de la Remolacha como Materia Prima

¿Por qué *Beta vulgaris*?

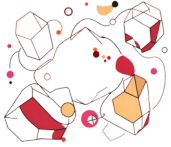
- Alto contenido de sacarosa (~14–18% en peso fresco), superior a muchas biomásas lignocelulósicas
- Cultivo disponible en climas templados; ciclo corto (~180 días)
- Generación de múltiples corrientes valorizables en una sola planta

Contexto Global

- Creciente demanda de biocombustibles y bioproductos como alternativa a los derivados del petróleo
- Regulaciones de carbono impulsan la inversión en biorrefinerías integradas
- La remolacha supera a la caña en rendimiento por hectárea en Europa y Asia Central



Productos y Subproductos de la Biorrefinería



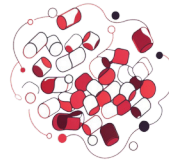
Sacarosa / Azúcar

Consumo humano y fermentación para etanol o ácido láctico. Rendimiento: ~135–150 kg/ton remolacha.



Etanol

Biocombustible 2G. Producción: ~80–90 L/ton remolacha a partir de sacarosa fermentada.



Ácido Láctico / PLA

Precursor de bioplásticos (PLA). Aplicaciones alimentarias y farmacéuticas de alto valor.



Biogás y Subproductos

Pulpa → biogás/alimento animal. Melaza → fermentación adicional. Vinaza → fertilizante. CO₂ → uso industrial.

Diagrama de Flujo del Proceso



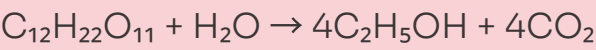
El proceso integra extracción de sacarosa con fermentación simultánea y valorización de cada corriente residual, maximizando la conversión de masa total de la remolacha.

Balance de Masa: Base 1,000 kg de Remolacha

Corriente	Masa (kg)	% del total
Agua (humedad)	760	76%
Sacarosa bruta	150	15%
Pulpa (fibra)	55	5.5%
Melaza residual	20	2%
Cenizas / otros	15	1.5%
Sacarosa extraída (η=90%)	135	13.5%
Etanol producido	~69	~6.9%
CO ₂ generado	~66	~6.6%

Ejemplo de Cálculo

Rendimiento en etanol:

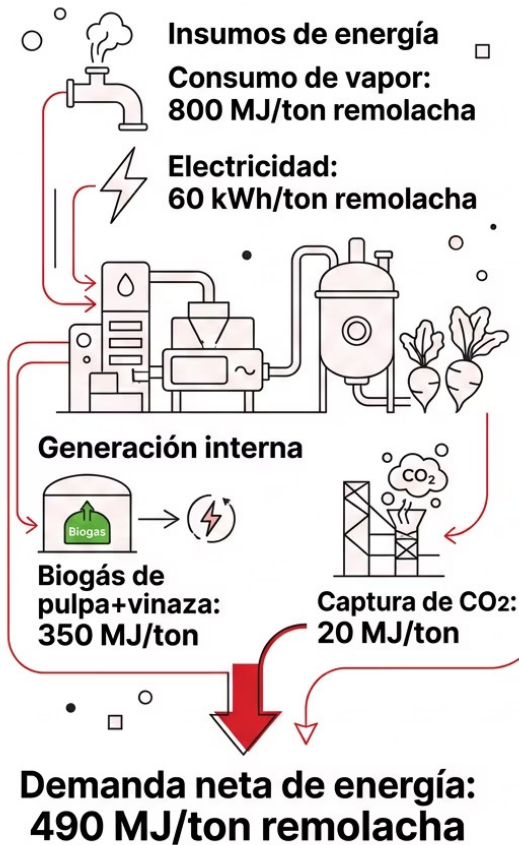


135 kg sacarosa × 0.51 (factor estequiométrico) ×
0.90 (eficiencia fermentativa) = **~62 kg etanol ≈ 78 L**

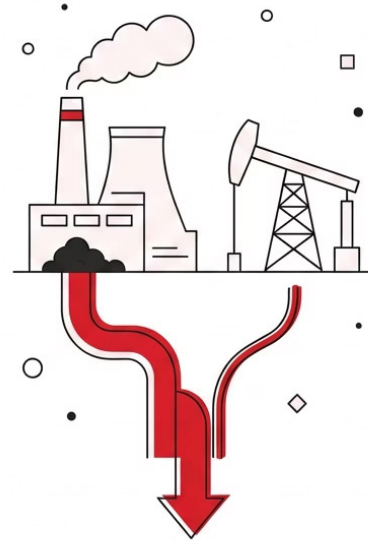
Pulpa seca: 55 kg × 0.25 (materia seca) = **~14 kg MS
disponibles para biogás**

Balance de Energía del Proceso

BIOREFINERÍA DE REMOLACHA



LÍNEA BASE FÓSIL



**Comparado
con base fósil:**
1200 MJ/ton

Consumo y Generación Típicos

- **Vapor:** 700–900 MJ/ton remolacha (evaporación y destilación)
- **Electricidad:** 50–70 kWh/ton remolacha
- **Biogás recuperado:** ~350 MJ/ton (digestión de pulpa + vinaza)
- **Integración energética:** reduce la demanda neta en ~30–40%

i La integración calórica mediante intercambiadores de calor (Pinch Analysis) es crítica para la viabilidad económica del proceso.

Tecnologías y Procesos Clave



Difusión en Contracorriente

Extracción de sacarosa a 70–75 °C, tiempo de residencia 60–90 min. Eficiencia >95% del azúcar soluble.



Fermentación con *S. cerevisiae*

T = 30–35 °C, pH = 4.5–5.0, tiempo: 24–48 h. Rendimiento etanol: 90–95% del teórico.



Fermentación con *Lactobacillus*

T = 40–45 °C, pH = 6.0. Rendimiento ácido láctico: >85%. Requiere neutralización con $\text{Ca}(\text{OH})_2$.



Digestión Anaeróbica

Pulpa + vinaza → biogás (55–65% CH_4). Producción estimada: 80–120 Nm^3 biogás/ton remolacha procesada.

Análisis Económico: CAPEX y OPEX

CAPEX — Inversión de Capital

Componente	Costo (US \$M)
Equipos principales (difusores, evaporadores, fermentadores, destiladores)	25 – 40
Construcción e instalación civil	12 – 20
Instrumentación y control	5 – 8
Servicios industriales (vapor, agua, electricidad)	4 – 7
Ingeniería y gestión del proyecto	4 – 5
CAPEX TOTAL (100,000 ton/año)	US \$ 50–80M

OPEX — Gastos Operativos Anuales

Componente	Costo (US \$M/año)
Materia prima (remolacha ~US \$35–45/ton)	3.5 – 4.5
Energía (vapor + electricidad)	4 – 6
Mano de obra y supervisión	2 – 3
Mantenimiento (~3% CAPEX)	1.5 – 2.4
Químicos auxiliares y otros	1 – 2
OPEX TOTAL	US \$ 12–18M/año

📌 TIR estimada: 12–18% | VAN (10 años, r=10%): US \$ 20–45M según mix de productos

Casos de Estudio

Caso 1 — Crescentino Bioethanol Plant (Italia)

- Materia prima: Paja y *Arundo donax* (modelo adaptable a remolacha)
- Productos: 40,000 ton/año bioetanol 2G + lignina + electricidad
- Inversión R&D: ~€140M ($\approx$ US \$ 155M)
- Lección clave: La valorización de lignina como co-generación de energía mejora el VAN en ~25%

Caso 2 — Biorrefinería Ácido Láctico / PLA (Modelo ITESO)

- Materia prima: Lactosuero y malta cervecera (estructura extrapolada a remolacha)
- Producto: Ácido láctico >99.5% pureza + biogás como energía auxiliar
- Costo de producción: US \$ 1.20–1.80/kg ácido láctico (mercado: US \$ 2.5–3.5/kg)
- Margen bruto estimado: ~50–60%

Ejemplo de Cálculo Integrado

Planta 100,000 ton/año remolacha:

- Sacarosa extraída: 13,500 ton/año
- Etanol producido: ~7,800 ton/año → ingreso: US \$ 7.8M/año (a US \$ 1.0/L)
- Biogás: 8–12 GWh/año → ahorro energético: US \$ 0.8–1.2M/año
- Ácido succínico (melaza): ~1,200 ton/año → US \$ 3.6M/año (a US \$ 3.0/kg)

Tablas de Referencia Técnica

Tabla 1 — Composición Típica de la Remolacha Azucarera

Componente	% peso fresco	kg/ton
Agua	75–78%	750–780
Sacarosa	14–18%	140–180
Fibra (celulosa + pectina)	4–6%	40–60
Proteínas	1–1.5%	10–15
Cenizas minerales	0.5–1%	5–10

Tabla 2 — Comparativa: Etanol de Remolacha vs. Caña de Azúcar

Parámetro	Remolacha	Caña
Rendimiento etanol (L/ton)	80–100	70–90
Costo producción (US \$/L)	0.55–0.75	0.40–0.60
Agua consumida (m³/ton)	1.5–2.5	2.0–3.5
Ciclo de cultivo (días)	150–200	270–360
Latitud de cultivo	Templada	Tropical

Desafíos y Oportunidades Futuras

→ Optimización de Rendimientos

Mejora de cepas fermentativas mediante ingeniería metabólica; aumento de eficiencias de extracción al 95%+.

→ Nuevas Rutas de Valorización

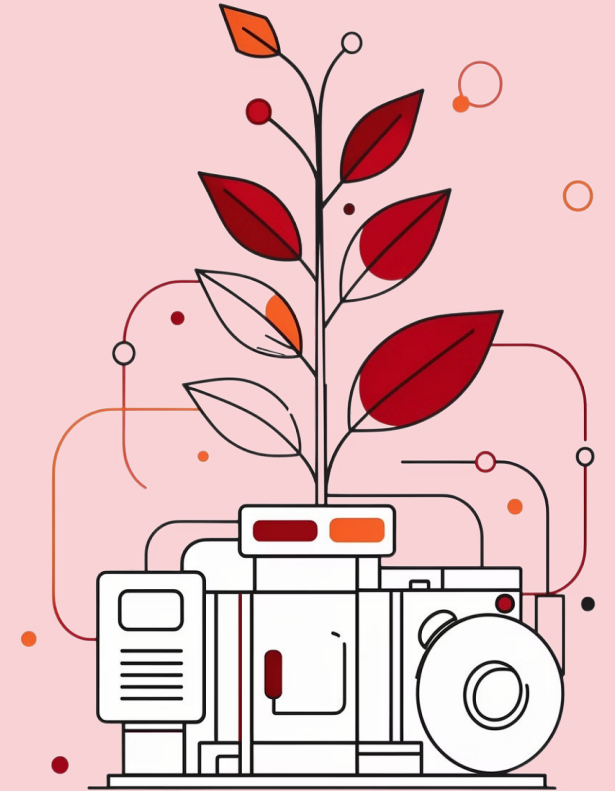
Producción de bioplásticos avanzados (PHBV, PBS) y ácido succínico a partir de corrientes residuales de bajo valor.

→ Integración Energética y Huella de Carbono

Aplicación de análisis Pinch y cogeneración para alcanzar biorrefinerías con balance de carbono neutro o negativo.

→ Políticas y Mercado

Los bonos de carbono, subsidios a biocombustibles y la demanda de packaging sostenible abren ventanas de inversión significativas.



Bibliografía y Referencias

Acevedo García, B. (2024). *Design and evaluation of sustainable biorefineries in Mexico: a modeling and experimental approach*. Tecnológico de Monterrey.

Clauser, N. M. (2019). *Estudio técnico-económico de la biorrefinería de residuos de industrialización primaria de la madera y agroindustriales*. CONICET.

González Cortés, M., et al. (2014). La integración de procesos en el esquema de una biorrefinería. *Afinidad. Journal of Chemical Engineering Theoretical and Applied Chemistry*, 71(568).

Dani Morán. (2015, April 9). *Crescentino Bioethanol Plant*. Biorrefineria.blogspot.com.

Hernández-Sánchez, P. (2023). *Análisis bidimensional de una biorrefinería avanzada para la revalorización de residuos agroalimentarios de la ZMG — Design For Six Sigma (DFSS)*. ITESO.

Liaño Abascal, N., et al. (2024). Estrategia de desarrollo de una fábrica de azúcar como biorrefinería incluyendo la producción de pellets para una bioeléctrica. *Tecnología Química*, 44(2), 254–268.

Sanchez, A., & Martinez-Victoria, S. (2023). Análisis tecno-económico de una biorrefinería negativa en carbono formulado como optimización multiobjetivo. *Tendencias en energías renovables y sustentabilidad*, 1(1).

García Haro, P. (2013). *Thermochemical Biorefineries based on DME as platform chemical — diseño conceptual y análisis tecno-económico*. Universidad de Sevilla.