

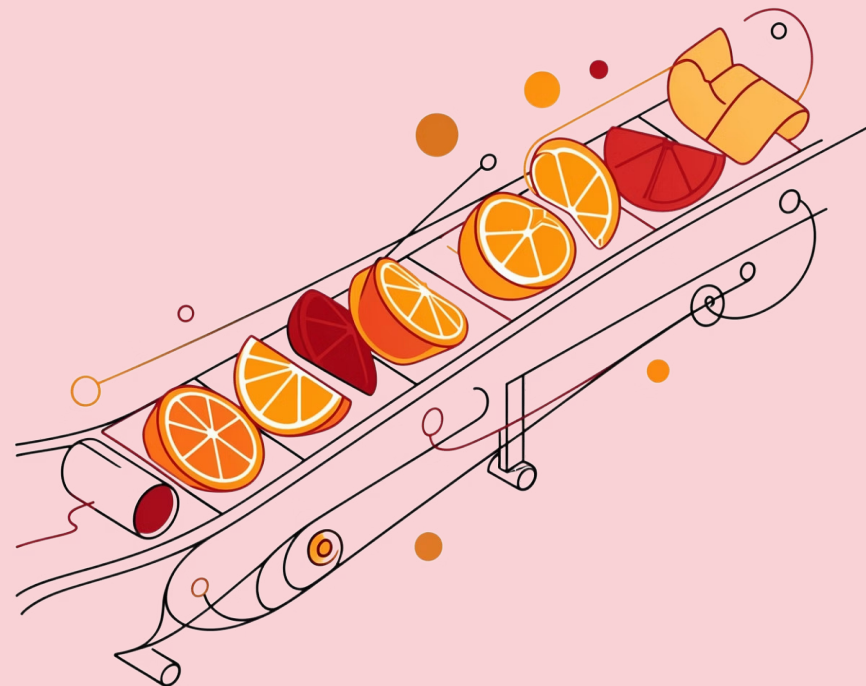
Biorrefinería de Naranja: Transformando Residuos en Valor

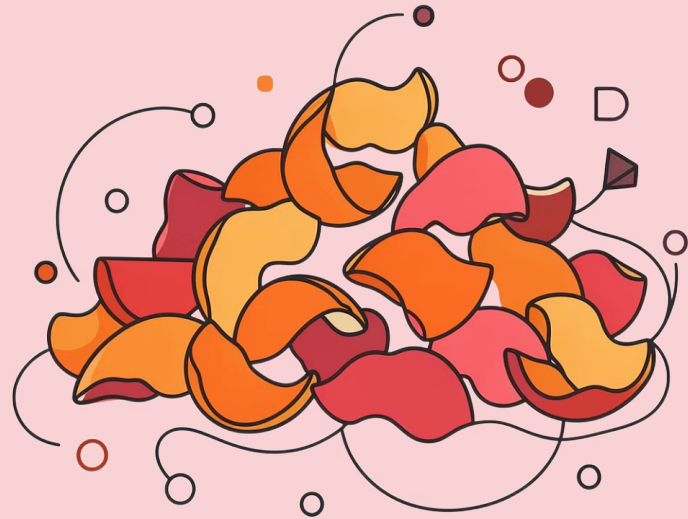
Un análisis técnico-económico integral para ingenieros de procesos industriales

INGENIERÍA DE PROCESOS

ECONOMÍA CIRCULAR

SOSTENIBILIDAD





El Desafío: Un Mar de Residuos de Naranja

Escala del Problema

La industria citrícola genera anualmente **millones de toneladas** de cáscara de naranja, un residuo orgánico de difícil disposición.

Contexto Regional

En Ecuador y Colombia, la cáscara representa entre el **40-60%** del peso del fruto procesado, generando costos logísticos y ambientales significativos.

Bajo Valor Agregado Actual

La valorización tradicional se limita a compostaje o relleno sanitario, desperdiciando compuestos de alto valor intrínseco.

La Oportunidad: La Biorrefinería como Solución Integral



¿Qué es una Biorrefinería?

Instalación que integra procesos de conversión de biomasa para producir **múltiples productos de alto valor** de forma simultánea, maximizando el aprovechamiento de cada fracción.



Caso Ecuador: Aceite esencial: 8.7 ton/año · Pectina: 44.4 ton/año — ambos obtenidos de la misma corriente de cáscara de naranja.

La sinergia entre productos permite amortizar costos fijos y mejorar la rentabilidad global del proceso.

Productos y Subproductos Clave



Aceite Esencial

Rico en **limoneno (80–85%)**. Aplicado en fragancias, alimentos y limpieza. Subproducto: hidrolato aromático.



Pectina

Gelificante natural esencial en mermeladas y jaleas. Extraída por hidrólisis ácida o enzimática.



Bioetanol

Combustible renovable o materia prima química. Obtenido por fermentación de azúcares residuales.



Harina Animal

Obtenida de residuos sólidos post-extracción. Alta fibra, bajo costo de producción.



Ácido Múxico

Producto emergente de alto valor derivado de la pectina. Aplicaciones en polímeros y farmacéutica.

Diagrama de Flujo del Proceso



Cada etapa genera corrientes de valor: el pretratamiento acondiciona la materia prima, la destilación produce aceite e hidrolato, la hidrólisis entrega pectina, y los sólidos finales se secan para harina. La recuperación de solventes es clave para reducir el OPEX.

Balances de Masa: Ejemplo de Cálculo

Base de Cálculo: 700 g de Cáscara Húmeda

Corriente	Cantidad	Observación
Cáscara húmeda (entrada)	700 g	~75% humedad
Aceite esencial obtenido	3.34 mL	80–85% limoneno
Hidrolato (subproducto)	500 mL	Agua aromática
Residuos sólidos secos	~260 g	Post-destilación
Pectina (de 50 g sólido)	9.7 g	Rendimiento ~19.4%
Harina animal	40.3 g	Residuo final seco

 Fuente: Dialnet / Muñoz Briones et al., 2021. Balance cerrado con cierre de masa >98%.

Balance Energético

La simulación en **Aspen Plus V9.0** permite calcular requerimientos de vapor y electricidad por etapa.

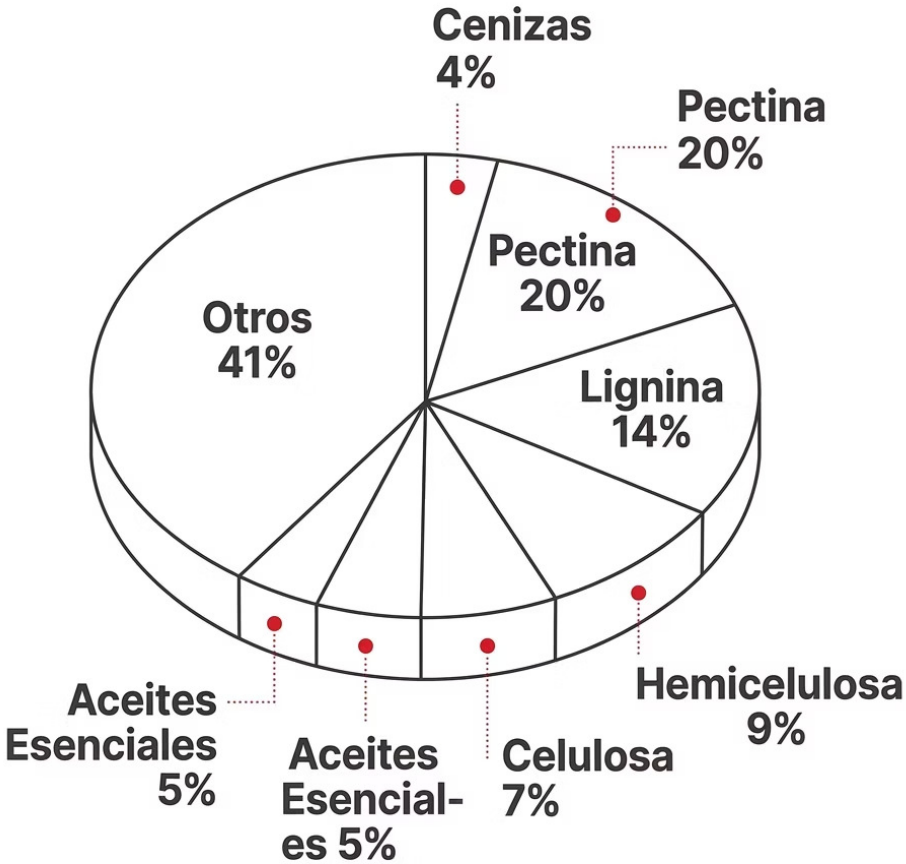
- Destilación: alta demanda de vapor vivo
- Secado: consumo energético dominante
- Hidrólisis: control de temperatura crítico
- Recuperación de etanol: reduce consumo neto

Composición de la Cáscara de Naranja

Tabla 1: Composición en Base Seca

Componente	Contenido (%)
Pectina	11.18 – 30.17
Celulosa	5.07 – 9.35
Lignina	9.35 – 18.60
Hemicelulosa	4.86 – 14.30
Aceites Esenciales	~4.86
Cenizas	3.30 – 3.70

Fuentes: VTT Technical Research Centre; ACS Publications



Análisis Económico: CAPEX y OPEX

CAPEX — Inversión de Capital

- Equipos: reactores, destiladores, centrífugas, secadores
- Instalación, ingeniería civil y puesta en marcha
- Escala 140 kg/h → viable económicamente (Ecuador)
- Escala 26,400 ton/año → ROI 17%, payback 6 años (Portugal)

OPEX — Costos Operativos

- Materia prima: recolección y transporte de cáscaras
- Energía: vapor y electricidad (mayor fracción del OPEX)
- Mano de obra y mantenimiento preventivo
- Consumibles: ácidos, solventes (etanol recirculado)

📌 **Estrategia clave:** La recirculación de etanol en la extracción de pectina reduce el OPEX de solventes hasta un 30%, mejorando significativamente la rentabilidad del proceso.

Casos de Estudio y Rentabilidad

1

Ecuador

Escala: 140 kg/h de cáscara.

Producción: aceite esencial + pectina. **Payback: 5–6 años.**

Impacto positivo económico, ambiental y social documentado.

2

Colombia

Valorización integral a pequeña escala. **VPN = \$27,271,933 USD · TIR = 5.27%.** Incluye aceite, pectina y harina animal como flujos de ingreso.

3

Portugal

Biorrefinería multiproducto. **26,400 ton/año → ROI 17%, payback 6 años.** Al escalar a 105,600 ton/año: **ROI sube al 27%** y payback se reduce a 4 años.

Consideraciones para Ingenieros de Procesos



Optimización

Selección de tecnologías eficientes y parámetros operativos óptimos (T, P, pH).



Diseño de Equipos

Dimensionamiento robusto para condiciones de operación variables según temporada.



Gestión de Residuos

Minimización y valorización de efluentes y subproductos secundarios.



ACV

Análisis de Ciclo de Vida para cuantificar el impacto ambiental integral del proceso.



Escalabilidad

Transición estructurada de laboratorio a planta piloto e industrial con criterios de similitud.

Conclusión: Rentabilidad y Sostenibilidad

Síntesis de Resultados



Solución viable

La biorrefinería convierte un residuo costoso en múltiples fuentes de ingresos.



Retorno atractivo

ROI entre 17–27% según escala, con payback de 4–6 años documentado.



Triple impacto

Beneficios económicos, ambientales y sociales verificados en múltiples casos.

Bibliografía

Muñoz Briones et al. (2021). ACI Avances en Ciencias e Ingenierías, 13(2).

Cardona Alzate (2020). Biochemical Engineering Journal, 161.

Bedoya Betancur et al. (2021). Ingeniería, 26(3), 367–380.

Lobo, B.A.O. (2021). Tesis MSc. Instituto Superior Técnico, Lisboa.

Martín, M. (2020). Industrial & Engineering Chemistry Research.