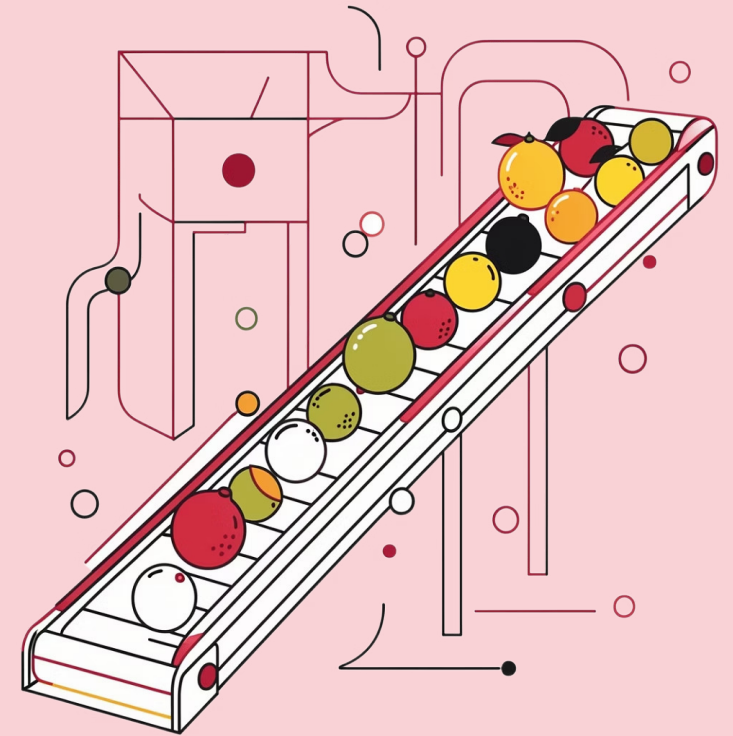


Biorrefinería de Limón: Transformando Residuos en Valor

Análisis técnico-económico integral para ingenieros de procesos industriales: productos, balances de masa y energía, CAPEX/OPEX y casos de estudio.



La Materia Prima y sus Tesoros Ocultos

El limón es mucho más que jugo y cáscara. Cada fracción de la fruta representa una fuente de valor aprovechable dentro del esquema de biorrefinería.



Cáscara

Rica en pectina, aceites esenciales y flavonoides de alto valor comercial.



Pulpa y Jugo Residual

Fuente de azúcares fermentables, limoneno y ácido cítrico.



Semillas

Contienen aceites vegetales y proteínas con potencial nutricional e industrial.



Residuos de Poda

Biomasa lignocelulósica apta para gasificación o producción de bioetanol.

El Corazón de la Biorrefinería: Procesos Clave



Los tres procesos centrales están interconectados: la energía generada por gasificación alimenta los procesos de extracción y fermentación, maximizando la eficiencia global del sistema.

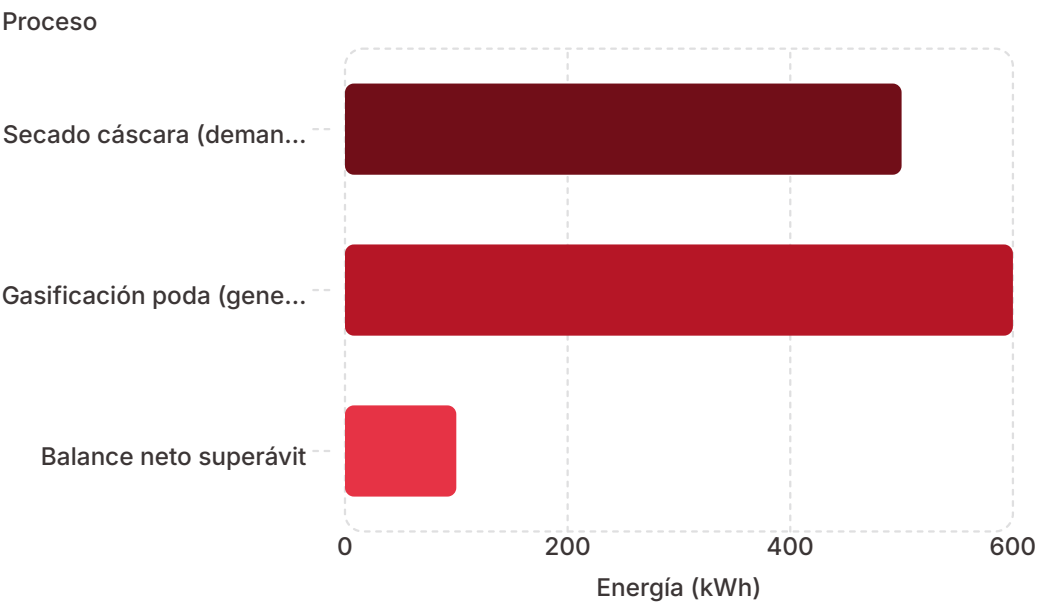
Balances de Masa y Energía

Balance de Masa — Base: 1,000 kg Limón Entero

Fracción	Masa (kg)	% del total
Jugo	400	40%
Cáscara	300	30%
Pulpa residual	200	20%
Semillas	100	10%

Balance de Energía

Concepto	Valor (kWh)
Secado de cáscara (gas natural)	-500
Generación por gasificación (syngas)	+600
Balance neto	+100 (superávit)



Productos de Alto Valor y Coproductos



Productos Principales

Ácido Cítrico

Alimentos, bebidas y farmacéutica. Precio: ~\$0.8–1.2 USD/kg.

Pectina

Gelificante y espesante premium. Precio: ~\$10–20 USD/kg.

Aceites Esenciales

Aromas y fragancias de alta demanda. Precio: ~\$8–15 USD/kg.

Bioetanol

Combustible renovable. Precio: ~\$0.5–0.7 USD/L.

Coproductos

Syngas

Generación de calor y electricidad in situ.

Lignina

Materiales compuestos y productos químicos.

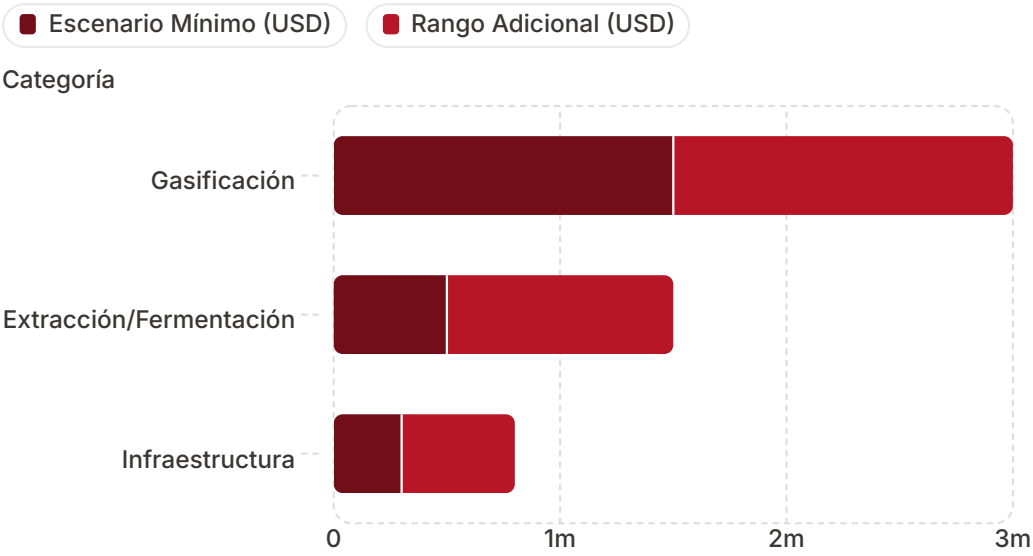
Tortas de Extracción

Alimentación animal o abono orgánico.

Viabilidad Económica: CAPEX y OPEX

CAPEX — Inversión de Capital Estimada

Componente	Rango (USD)
Planta de gasificación	\$1,500,000 – \$3,000,000
Extracción y fermentación	\$500,000 – \$1,500,000
Infraestructura y control	\$300,000 – \$800,000
Total Estimado	\$2,300,000 – \$5,300,000



OPEX — Costos Anuales de Operación

Rubro	Estimación Anual (USD)
Materia prima (residuos)	Bajo / costo de recolección
Energía (syngas propio)	Reducido vs. gas natural
Mano de obra y mantenimiento	\$300,000 – \$700,000
Insumos y químicos	\$200,000 – \$500,000
Total Anual Estimado	\$500,000 – \$1,200,000

Ejemplos de Cálculo y Análisis de Costos

Costo de Producción de Bioetanol (por kg de azúcares)

Concepto	Costo (USD/kg azúcares)
Materia prima (residuos)	\$0.05
Enzimas y levaduras	\$0.10
Energía (proceso)	\$0.08
Costos fijos (CAPEX amortizado + MO)	\$0.20
Costo Total Estimado	\$0.43

Con un precio de venta de bioetanol de ~\$0.55 USD/kg de azúcares convertidos, el margen bruto estimado es de **\$0.12 USD/kg** (~28% sobre costo).

Análisis de Sensibilidad: Factores Clave

→ Precio del Gas Natural

Un incremento del 20% en gas natural aumenta el costo energético en ~\$0.016 USD/kg de producto.

→ Créditos de Carbono

A 6 €/t CO₂, la biorrefinería genera ingresos adicionales que mejoran el VAN del proyecto en ~15%.

→ Escala de Producción

Duplicar la capacidad reduce el OPEX unitario en un 30–35% por economías de escala.

Diagrama de Flujo Integrado de la Biorrefinería



El diagrama ilustra la interconexión completa de flujos de materia y energía. La energía generada por gasificación (syngas) se reinvierte en los procesos de secado y extracción, cerrando el ciclo energético interno de la planta.

Casos de Estudio Inspiradores



Planta de Gasificación — Tucumán, Argentina

Evaluación técnico-económica para abastecer energéticamente una citrícola con residuos de poda de limón.

Inversión: **~\$200,000 USD (2018)**. Viable con préstamos subsidiados o créditos de carbono **> 6 €/t CO₂**. *Fuente: Revista Industrial y Agrícola de Tucumán, Diaz & Paz (2018).*



Biorrefinería de Plátano — Concepto Análogo

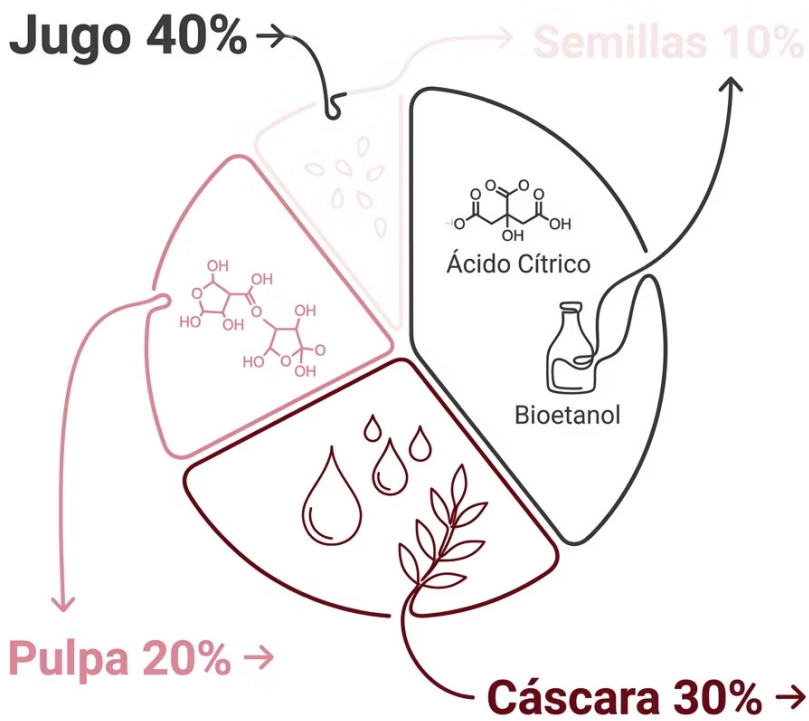
Evaluación tecno-económica de producción simultánea de etanol, furfural, ácido láctico y xilitol a partir de residuos de plátano. Demuestra que los **coproductos de alto valor** son clave para viabilidad financiera. *Fuente: Revista de la Facultad de Ciencias Químicas.*

Composición de Residuos y Subproductos del Limón

Tabla 1: Composición Típica de Residuos de Limón

Comp onent e	% Hume dad	% Ceniza s	% Lignoc el.	% Azúca res	% Aceite s
Poda	50	5	70	5	—
Cáscar a	70	3	15	20	2
Pulpa	85	2	5	10	—
Semill as	45	4	20	8	15

❑ Los residuos de poda presentan la mayor fracción lignocelulósica (70%), siendo el insumo óptimo para gasificación. La cáscara concentra el mayor valor por aceites y azúcares.



Sostenibilidad y Perspectivas Futuras



Impacto Ambiental

Reducción de residuos sólidos, menor dependencia de combustibles fósiles y huella de carbono significativamente reducida.



Oportunidades de Mercado

Creciente demanda global de productos biobasados: pectinas, ácidos orgánicos y biocombustibles en mercados premium.



Innovación Continua

Nuevas tecnologías de extracción supercrítica, fermentación de estado sólido y valorización avanzada de lignina.

Bibliografía y Referencias

Diaz & Paz (2018)

Evaluación técnico-económica de planta de gasificación de biomasa residual de limón para abastecimiento energético en Tucumán. *Revista Industrial y Agrícola de Tucumán*.

Cardona Alzate et al. (2014)

La integración de procesos en el esquema de una biorrefinería. *Afinidad: Journal of Chemical Engineering Theoretical and Applied Chemistry*.

Cardona Alzate, Serna-Loaiza & Ortiz-Sanchez (2020)

Sustainable Biorefineries: What was Learned from the Design, Analysis and Implementation. *Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems*, 8(1), 88–117.

Literatura Complementaria Recomendada

Estudios sobre biorrefinerías de cítricos, valorización de pectinas y aceites esenciales, y análisis de ciclo de vida (LCA) para residuos agroindustriales.