



Biorrefinería del Arroz

Análisis Integral de Productos, Subproductos, Balances de Masa y Energía, y Economía de Procesos

Una visión técnica y cuantitativa del aprovechamiento integral del arroz como plataforma de biorrefinería industrial, orientada a ingenieros especialistas en procesos.

INGENIERÍA DE PROCESOS

BIORREFINERÍA

ECONOMÍA INDUSTRIAL

Agenda

01

Concepto de Biorrefinería del Arroz

Cadena de valor y marco conceptual del procesamiento integral

02

Productos y Subproductos Principales

Clasificación técnica y caracterización de cada fracción

03

Balances de Masa y Energía

Cálculos detallados con ejemplos numéricos y tablas de referencia

04

Análisis Económico CAPEX / OPEX

Estimación de inversiones y costes operativos en US \$

05

Casos de Estudio y Bibliografía

Plantas de referencia mundial y fuentes técnicas citadas



Concepto de Biorrefinería del Arroz

La biorrefinería del arroz integra el procesamiento del grano con la valorización completa de cada fracción residual, generando múltiples flujos de valor simultáneamente. A diferencia del molino convencional, que prioriza el arroz blanco, la biorrefinería optimiza el rendimiento económico global de la cadena.

Principio Central

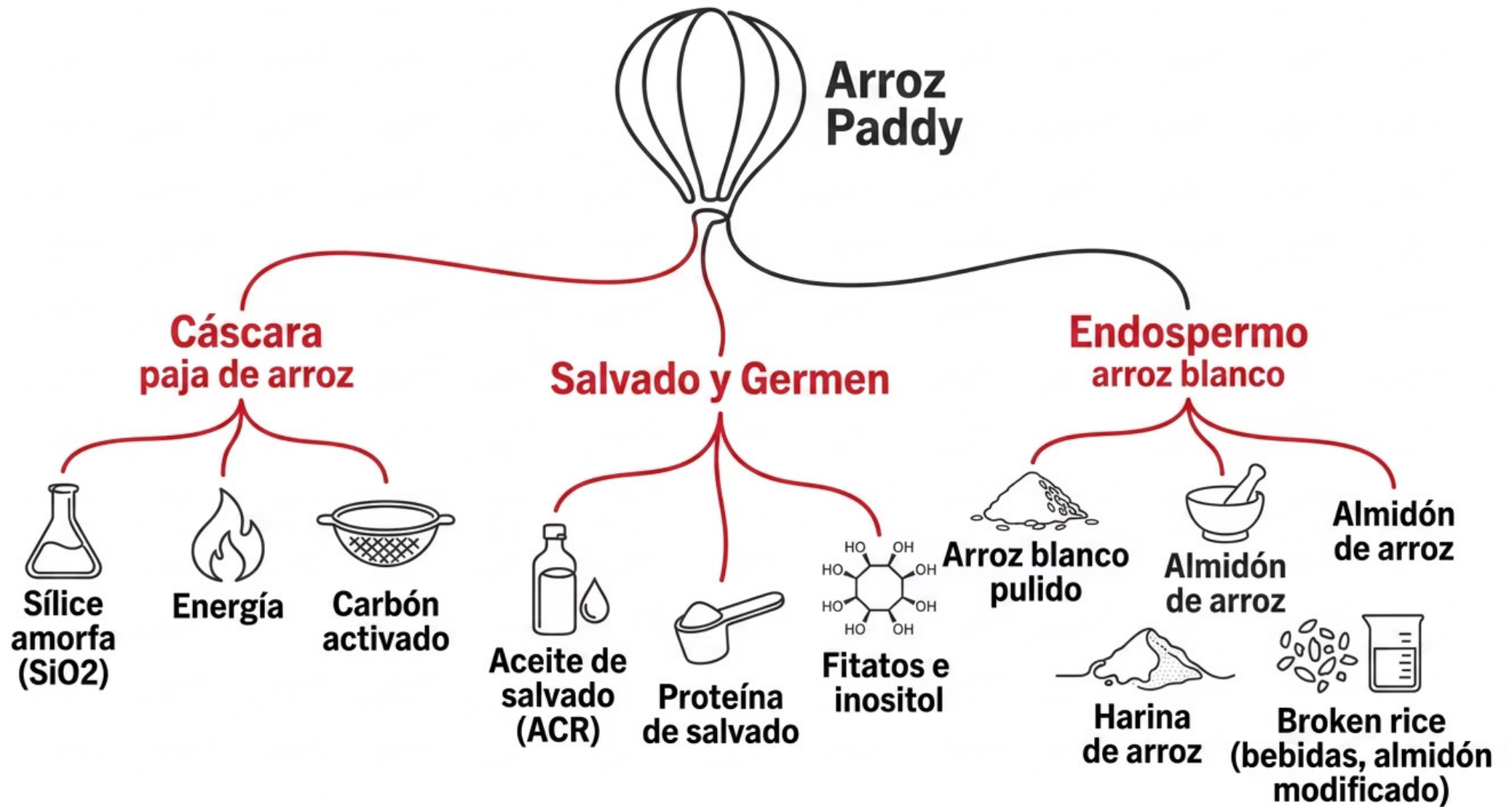
Cero residuos: cada fracción del paddy se convierte en un producto con valor de mercado identificado.

Fracciones del Arroz Paddy (base 100 kg)

- Cáscara (paja): 20 kg — 20 %
- Salvado + germen: 8-10 kg — 8-10 %
- Arroz integral: 72-74 kg — 72-74 %
- Arroz blanco (milling): 65-68 kg — 65-68 %
- Harina de arroz (broken): 4-6 kg — 4-6 %

Mapa de Productos y Subproductos

El siguiente diagrama resume la cascada de valorización desde el arroz paddy hasta los productos finales de mayor valor añadido.



Cada rama del árbol representa una línea de proceso con inversión, costes operativos y precio de mercado diferenciados. La integración de todas las ramas define la rentabilidad global del complejo.

Caracterización Técnica de Productos Clave



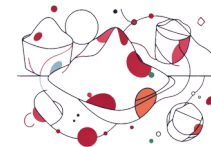
Aceite de Salvado de Arroz (ACR)

Contenido graso del salvado: 15–22 %. Proceso: extracción por hexano o expeller + refinado (neutralización, blanqueado, desodorización). Punto de humo: 254 °C. Precio FOB Asia: **\$900–\$1,200/t**. Rico en γ -orizanol (1–2 %) con valor nutracéutico.



Sílice Amorfa (RHA-SiO₂)

Ceniza de cáscara de arroz (RHA): 15–20 % del peso de cáscara. Contenido SiO₂: 85–98 % en función del régimen de combustión. Aplicaciones: cemento, caucho, semiconductores. Precio: **\$300–\$2,500/t** según pureza.



Almidón de Arroz

Contenido en endospermo: 75–80 % bs. Granulometría: 3–8 μ m (el más fino de los cereales). Proceso: molienda húmeda + purificación alcalina. Aplicaciones: alimentos, farmacia, cosméticos. Precio: **\$600–\$1,800/t** según grado.



Energía de la Cáscara

PCI cáscara seca: 14–16 MJ/kg. Gasificación (syngas): eficiencia ~70 %. Combustión directa: vapor saturado a 15 bar. Capacidad típica: 1 MW por cada 1,500 t/año de cáscara. Precio energía vendida: **\$0.06–0.10/kWh**.

Balance de Masa — Ejemplo de Cálculo

Base de cálculo: 100 t/día de arroz paddy (húmedo, 22 % humedad)

Fracción / Corriente	Masa Húmeda (t/d)	Humedad (%)	Masa Seca (t/d)	% sobre paddy seco
Arroz paddy entrada	100.0	22.0	78.0	100.0 %
Cáscara (paja)	20.0	10.0	18.0	23.1 %
Salvado + germen	8.5	12.0	7.5	9.6 %
Arroz blanco pulido	65.0	13.0	56.6	72.5 %
Broken rice (≤ 75 %)	5.0	13.0	4.4	5.6 %
Pérdidas (polvo, fino)	1.5	—	—	—
TOTAL salidas verificadas	100.0	—	86.5	—

 Ejemplo de cálculo: Aceite extraíble del salvado = 8.5 t/d × 0.18 (contenido graso) × 0.85 (rendimiento extracción) = **1.30 t/d de ACR crudo**. Refinado (~90 % rendimiento) → **1.17 t/d de aceite refinado**.

Balance de Energía — Sistema Integrado

Base: 100 t/día de paddy → 20 t/d de cáscara disponible para cogeneración

Entradas Energéticas

Fuente	Energía (GJ/d)
PCI cáscara seca (18 t × 15 MJ/kg)	270.0 GJ/d
Electricidad red (proceso molienda)	28.8 GJ/d
Gas natural (secado paddy)	36.0 GJ/d
Total entrada	334.8 GJ/d

Rendimiento Energético Global

Eficiencia cogeneración (vapor + electricidad): **68 %**. Energía útil generada: **183.6 GJ/d**. Electricidad exportable estimada: **~1,200 kWh/d** (tras autoconsumo).

Salidas Energéticas

Destino	Energía (GJ/d)
Vapor proceso molienda	72.0 GJ/d
Electricidad autogenerada	54.0 GJ/d
Calor proceso secado	57.6 GJ/d
Pérdidas (chimenea + conv.)	86.4 GJ/d
RHA (calor sensible ceniza)	4.8 GJ/d
Electricidad exportada	4.3 GJ/d
Total salidas	279.1 GJ/d

❏ Nota: diferencia de cierre (~55 GJ/d) corresponde a calor residual en efluentes de agua de proceso no recuperados en configuración básica.

Análisis Económico — CAPEX

Estimación de inversión de capital para una biorrefinería integrada de arroz de **100 t/día de paddy** (escala industrial media). Costes en US \$ (año base 2023, factor de localización sudeste asiático / América Latina = 0.85).

Unidad de Proceso	CAPEX Base (US \$M)	Factor Localización	CAPEX Ajustado (US \$M)
Recepción, limpieza y secado	1.20	0.85	1.02
Molienda y blanqueo	3.50	0.85	2.98
Extracción de aceite de salvado	4.80	0.85	4.08
Refinado de aceite (RBDW)	2.10	0.85	1.79
Planta de cogeneración (biomasa)	5.50	0.85	4.68
Procesamiento RHA / SiO ₂	1.80	0.85	1.53
Almidón de arroz (opcional)	6.00	0.85	5.10
Infraestructura y servicios	2.50	0.85	2.13
Ingeniería, contingencia (15 %)	—	—	3.50
TOTAL CAPEX	27.40	—	26.81

 Método de estimación: Factored Lang Method (Lang factor = 4.5 para plantas de proceso mixto). CAPEX específico: ~\$268,000 USD/t-día de capacidad instalada.

Análisis Económico — OPEX y Rentabilidad

OPEX Anual Estimado

Base: 330 días/año de operación

- Materia prima (paddy): \$9.24 M/año
- Energía (gas + red eléct.): \$1.45 M/año
- Mano de obra (60 FTE): \$1.20 M/año
- Mantenimiento (3 % CAPEX): \$0.80 M/año
- Químicos y auxiliares: \$0.55 M/año
- Seguros y administración: \$0.38 M/año
- **OPEX Total: \$13.62 M/año**

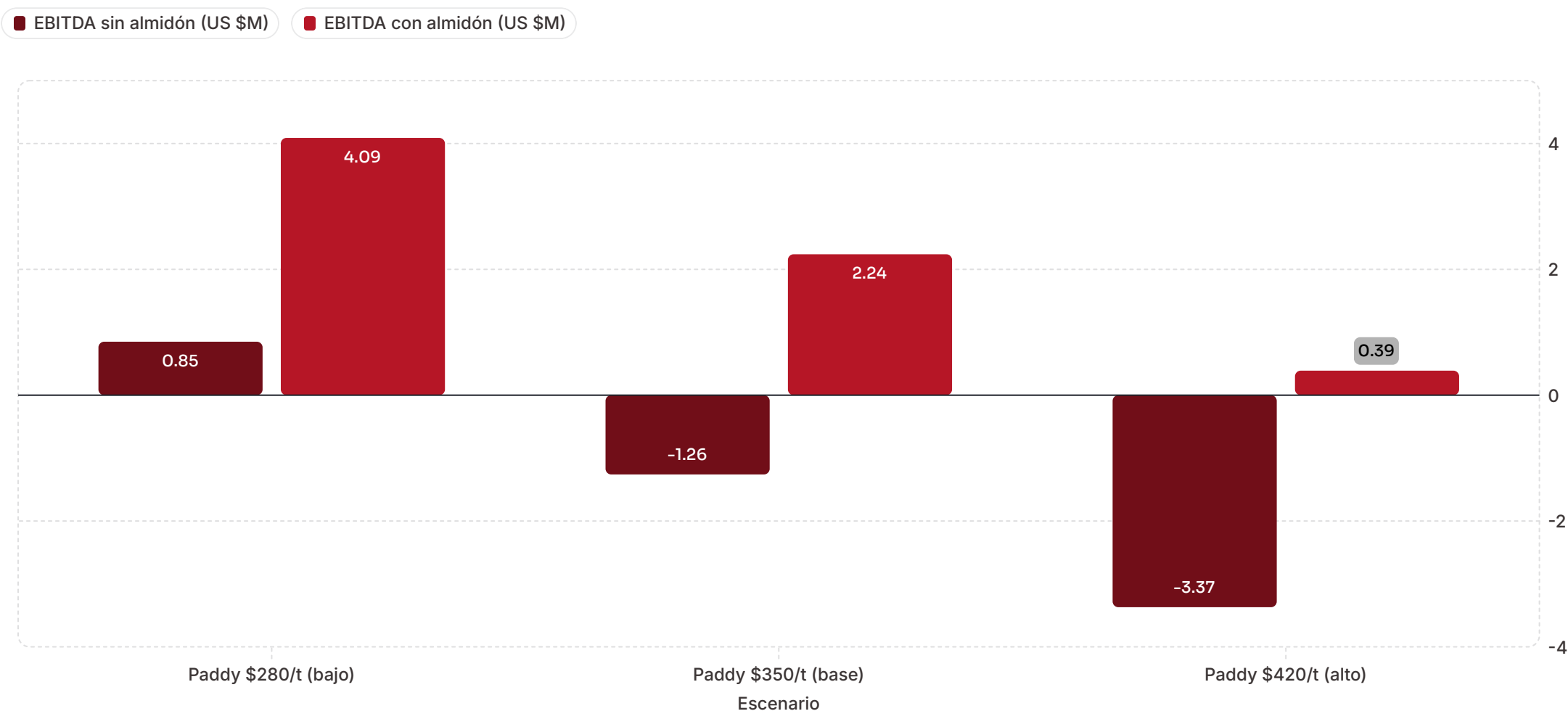
Ingresos y Análisis de Rentabilidad

Producto	Producción (t/año)	Ingreso (US \$M/año)
Arroz blanco pulido	21,450	\$10.30
Aceite de salvado refinado	386	\$0.42
Broken rice / harina	1,650	\$0.53
SiO ₂ amorfa (RHA)	540	\$0.65
Energía eléctrica vendida	—	\$0.28
Salvado estabilizado	924	\$0.18
Ingreso Total	—	\$12.36 M/año

⚠ EBITDA estimado: **-\$1.26 M/año** sin línea de almidón. Con línea de almidón activa (+\$3.5 M/año ingresos, +\$0.9 M/año OPEX incremental): EBITDA = **+\$2.24 M/año**. Payback simple: **~12 años**.

Sensibilidad Económica — Precio del Paddy vs. EBITDA

El precio de compra del arroz paddy es la variable más crítica para la rentabilidad. El siguiente análisis muestra el EBITDA proyectado bajo tres escenarios de precio de paddy, considerando la planta completa con línea de almidón activa.



La línea de almidón de arroz actúa como **palanca de rentabilidad crítica**: transforma un escenario marginal o negativo en positivo en todos los escenarios de precio de paddy analizados. Sensibilidad: cada \$10/t de variación en paddy impacta el EBITDA en ±\$0.33 M/año.

Caso de Estudio 1 — Riviana Foods (EE.UU.)

Descripción de la Planta

Riviana Foods opera el mayor complejo de molienda de arroz de América del Norte, con capacidad de procesamiento de **600 t/día de paddy** en su planta de Stuttgart, Arkansas. Integra cogeneración con cáscara y extracción de aceite de salvado estabilizado.

- CAPEX total (2019): ~\$120 M USD
- OPEX anual: ~\$68 M USD
- Ingresos anuales: ~\$290 M USD
- Empleo directo: 420 FTE

Indicadores de Proceso

Parámetro	Valor
Rendimiento molienda	68.5 %
Extracción aceite salvado	82 %
Autoabastecimiento energético	74 %
Generación RHA	~1,800 t/año
Ventas RHA a cemento	\$320/t USD
Payback ajustado	8.5 años

✔ Lección clave: la cogeneración con cáscara y la venta de RHA a la industria cementera reducen el OPEX neto en un **18 %** respecto a plantas convencionales.

Caso de Estudio 2 — Kuala Lumpur Kepong (Malasia)

Planta de Aceite de Salvado de Arroz — KLK Edible Oils

KLK opera una planta integrada de extracción y refinado de aceite de salvado en Malasia con capacidad de **200 t/día de salvado fresco**. Es referencia global en estabilización enzimática de salvado.

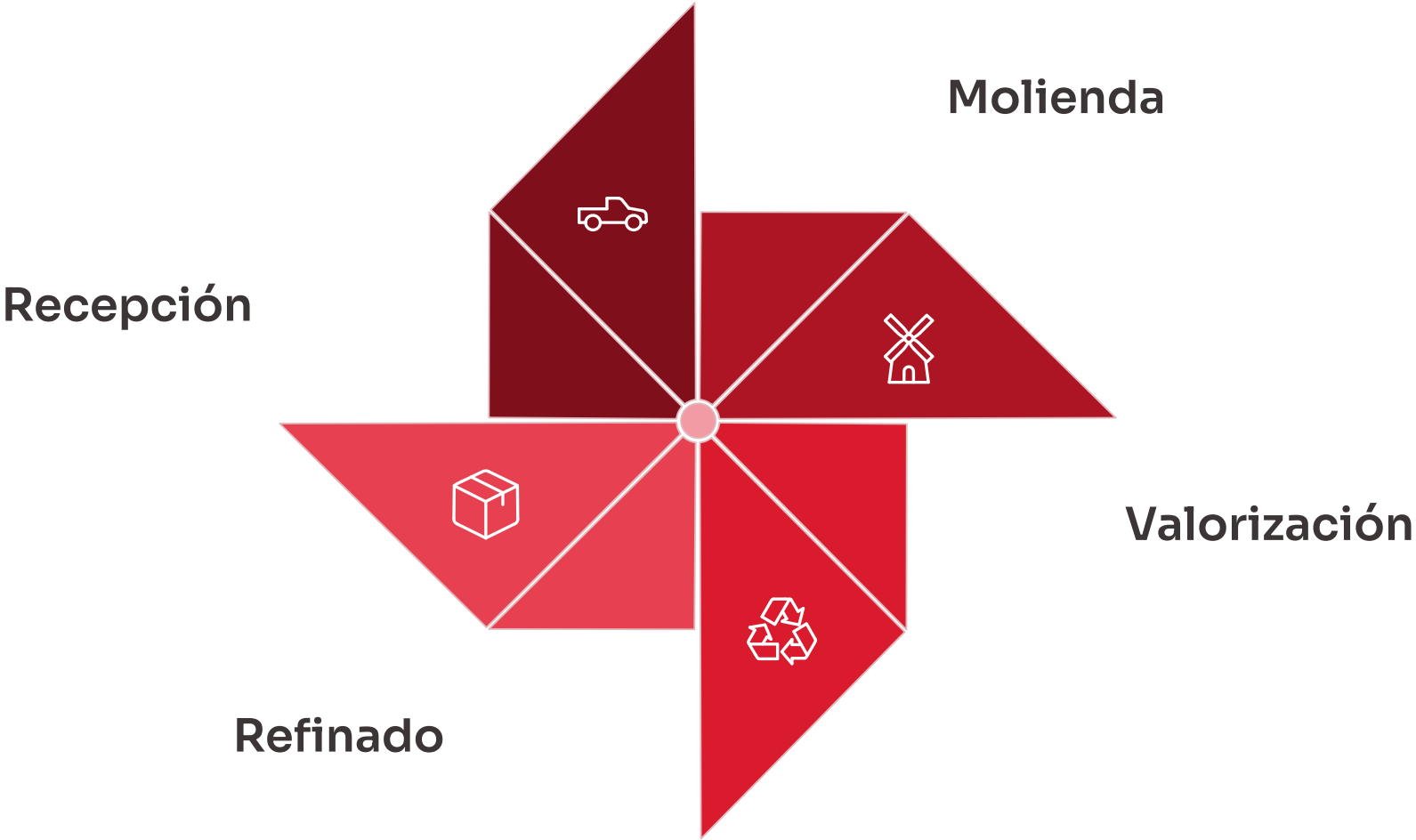
- Tecnología: inactivación lipasa + extracción hexano
- Inversión específica: **\$4,200 USD/t-día de salvado**
- Rendimiento ACR refinado: 16.5 % sobre salvado
- Precio de venta ACR: \$1,050 USD/t (2023)
- Exportación a UE y Japón: 60 % de producción

Indicadores Financieros (USD)

Indicador	Valor
CAPEX total planta	\$29.4 M USD
OPEX anual	\$18.2 M USD
Ingresos anuales (ACR + subprod.)	\$24.8 M USD
EBITDA anual	\$6.6 M USD
Margen EBITDA	26.6 %
Payback simple	4.5 años
TIR (20 años)	18.2 %

✓ La estabilización enzimática del salvado **en planta** (máx. 4 h post-molienda) es el factor decisivo para alcanzar un ACR de calidad premium exportable.

Diagrama de Flujo de Proceso — Biorrefinería Integrada



El flujo integrado permite una gestión eficiente de la materia prima, minimizando tiempos de espera entre la molienda y el procesamiento del salvado — factor crítico para preservar la calidad del aceite extraíble.

Ejemplo de Cálculo — Dimensionamiento del Extractor de Aceite

Datos de diseño para una planta de 100 t/día de paddy

Parámetros de Entrada

Variable	Valor
Flujo de salvado fresco	8.5 t/d
Contenido graso salvado	18 % bs
Humedad salvado	12 %
Relación solvente/sólido (S/F)	1.5:1 (v/m)
Temperatura extracción	60 °C
Tiempo residencia extractor	45 min
Rendimiento extracción (η)	85 %

Cálculo de ACR Crudo Obtenido

Paso 1. Salvado seco: $8.5 \times (1 - 0.12) = \mathbf{7.48 \text{ t/d bs}}$

Paso 2. Grasa disponible: $7.48 \times 0.18 = \mathbf{1.347 \text{ t/d}}$

Paso 3. ACR crudo extraído: $1.347 \times 0.85 = \mathbf{1.145 \text{ t/d}}$

Paso 4. Hexano requerido: $8.5 \times 1.5 = \mathbf{12.75 \text{ t/d}}$

Paso 5. Volumen extractor ($\tau = 45 \text{ min}$, densidad miscela $\sim 0.7 \text{ t/m}^3$):

$V = (12.75 / 0.7) \times (45/1,440) = \mathbf{0.57 \text{ m}^3} \rightarrow$ seleccionar extractor de 0.8 m^3 útil con factor de seguridad 1.4.

📄 Consumo específico de hexano (pérdidas): $\sim 2\text{--}3 \text{ kg hexano/t}$ de salvado procesado $\rightarrow \mathbf{17\text{--}26 \text{ kg/d de make-up}}$.

Producción de Sílice Amorfa — Balance y Economía

La ceniza de cáscara de arroz (RHA) generada en la caldera de cogeneración contiene hasta un **98 % de SiO₂ amorfa** si la temperatura de combustión se controla entre 550–700 °C. Por encima de 800 °C se produce sílice cristalina (cuarzo), que reduce el valor comercial y presenta riesgos para la salud.

Generación RHA

20 t/d cáscara × 0.18 = **3.6 t/d**

RHA en combustión
controlada a 600 °C

SiO₂ Extraíble

3.6 t/d × 0.92 (pureza tras
clasificación) = **3.31 t/d SiO₂**
grado industrial

Precio de Mercado

Grado cementero: **\$300/t.**

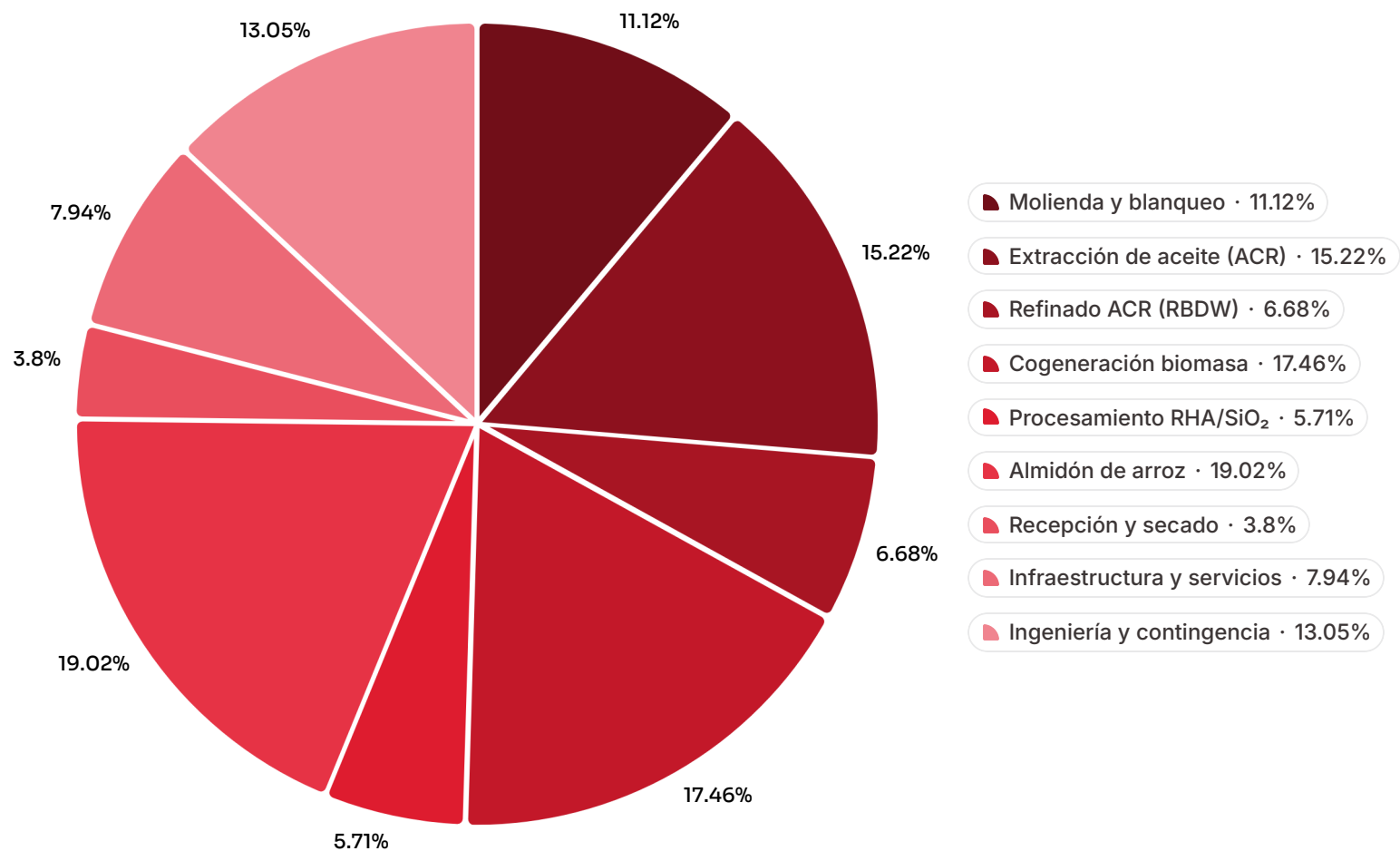
Grado caucho: **\$800/t.** Grado
semiconductor: **\$2,500/t**

Ingreso Anual (grado caucho)

3.31 × 330 × \$800 =
\$873,480/año con inversión
incremental de ~\$1.5 M USD

Infografía de Costes: Estructura CAPEX por Unidad

La distribución del CAPEX revela que la cogeneración y la extracción de aceite concentran más del 50 % de la inversión total, siendo también las líneas de mayor retorno económico en la biorrefinería integrada.



Comparativa de Tecnologías de Cogeneración con Cáscara

La selección de la tecnología de conversión energética de la cáscara define tanto la eficiencia global del sistema como el perfil de inversión requerido.

Tecnología	Eficiencia Eléctrica	CAPEX (US \$/kW)	OPEX (US \$/MWh)	Observaciones
Caldera de parrilla + turbina vapor	18–22 %	\$1,800–2,500	\$12–18	Tecnología madura, bajo riesgo operativo
Gasificación downdraft + motor	22–28 %	\$2,200–3,000	\$18–25	Alta flexibilidad, problemas con alquitranes
Gasificación fluidized bed + turbina	28–34 %	\$3,000–4,200	\$20–28	Mayor eficiencia, requiere operador especializado
Pirólisis + bio-oil	15–20 % (elec.)	\$2,500–3,800	\$22–35	Genera biochar de valor añadido adicional
Peletización para venta directa	N/A	\$400–800	\$8–12	Menor complejidad, ingreso por venta de pellets

 Recomendación técnica para plantas <500 t/día paddy: **caldera de parrilla + turbina de vapor de contrapresión** ofrece la mejor relación riesgo/retorno para cogeneración integrada.

Conclusiones y Hoja de Ruta de Implementación



Fase 1 — Diagnóstico (meses 1–3)

Auditoría de materias primas, caracterización de cáscara y salvado, análisis de mercados locales para SiO₂ y ACR. Inversión estimada: **\$80,000–120,000 USD**.



Fase 2 — Ingeniería Básica (meses 4–9)

FEED (Front-End Engineering Design), simulación de procesos (Aspen Plus / SuperPro), balances detallados y estimación clase 3 de CAPEX/OPEX. Coste: **\$300,000–500,000 USD**.



Fase 4 — Optimización y Expansión (año 3+)

Integración de la línea de almidón de arroz como **palanca de rentabilidad prioritaria**. Exploración de mercados premium: SiO₂ para electrónica, γ-orizanol para nutracéuticos.



Fase 3 — EPC y Puesta en Marcha (meses 10–30)

Engineering, Procurement & Construction. Instalación secuencial: molienda → cogeneración → extracción ACR → SiO₂. Arranque progresivo para reducir riesgo operativo.

Métricas Clave de la Biorrefinería

\$26.8M

CAPEX Total

Planta integrada de 100 t/día de paddy con cogeneración, ACR y SiO₂

68%

Autoabastecimiento

Cobertura energética mediante cogeneración con cáscara de arroz

\$2.24M

EBITDA Anual

Con línea de almidón activa a precio de paddy base de \$350/t

12yr

Payback Simple

Configuración completa; reducible a 8–9 años con optimización de mercado

98%

Pureza SiO₂

RHA procesada a 600 °C con clasificación neumática posterior

5

Líneas de Producto

Arroz blanco, ACR, SiO₂, energía eléctrica, harina/broken rice

Bibliografía y Fuentes Técnicas

Referencias Técnicas Principales

1. Juliano, B.O. (1985). *Rice: Chemistry and Technology*. AACC International, St. Paul, MN.
2. Srinivasan, M. et al. (2020). "Rice bran oil extraction: process design and economics." *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 97(4), 345–362.
3. Pode, R. (2016). "Potential applications of rice husk ash waste from rice husk combustion: A review." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 53, 1468–1485.
4. FAO (2023). *Rice Market Monitor*. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
5. Peters, M.S., Timmerhaus, K.D. & West, R.E. (2003). *Plant Design and Economics for Chemical Engineers*. 5th ed. McGraw-Hill, New York.

Normas y Guías de Proceso

1. IRRI (2022). *Paddy Milling Performance Standards*. International Rice Research Institute, Los Baños, Philippines.
2. ASABE Standard S352.2 (2019). *Moisture Measurement of Unground Grain and Seeds*. ASABE, St. Joseph, MI.
3. Aspen Technology (2023). *Aspen Plus® Rice Bran Oil Extraction Template*. Burlington, MA.
4. World Bank (2021). *Commodity Markets Outlook: Agricultural Commodities*. Washington, D.C.
5. IRENA (2022). *Biomass for Power Generation: Costs and Performance*. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.

❏ Todos los precios de mercado citados en la presentación corresponden al período **2022–2023** y deben actualizarse con índices CEPCI o PPI para estudios de factibilidad vigentes.