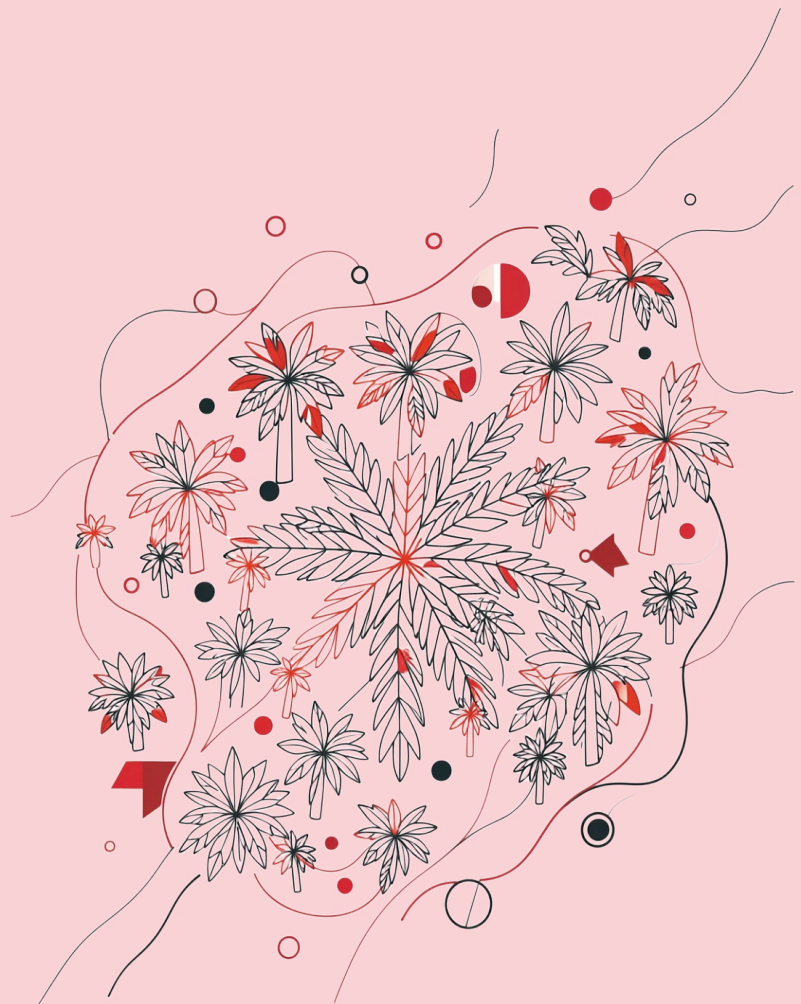




Biorrefinería de la Palma Aceitera

Análisis integral de productos, subproductos, balances de masa y energía, costos CAPEX/OPEX y casos de estudio aplicados para ingenieros de procesos industriales.

INGENIERÍA DE PROCESOS

BIORREFINERÍA

ELAEIS GUINEENSIS

Agenda

Este análisis cubre el ciclo completo de la biorrefinería de palma aceitera, desde la materia prima hasta los flujos económicos de inversión y operación.

01

Fundamentos del proceso

Composición de la fruta y esquema general de la biorrefinería

02

Productos y subproductos

Aceite de palma, palmiste, biomasa, biogás y coproductos de valor añadido

03

Balances de masa y energía

Cuantificación de flujos másicos y calóricos con ejemplos de cálculo

04

Análisis económico CAPEX/OPEX

Estimación de costos de capital y operación para una planta de referencia

05

Casos de estudio y bibliografía

Plantas reales en Malaysia, Colombia e Indonesia con lecciones aprendidas

Composición de la Fruta y Esquema General de la Biorrefinería

El Racimo de Fruta Fresca (RFF) de *Elaeis guineensis* es la materia prima fundamental. Su composición determina el potencial de rendimiento de toda la biorrefinería.

Composición típica del RFF

- Mesocarpo (pulpa): 60–65% del RFF
- Endocarpo (cáscara): 7–9% del RFF
- Almendra (palmiste): 6–8% del RFF
- Raquis y fibra: 20–23% del RFF
- Humedad total: 35–45% base húmeda

Contenido lipídico aprovechable

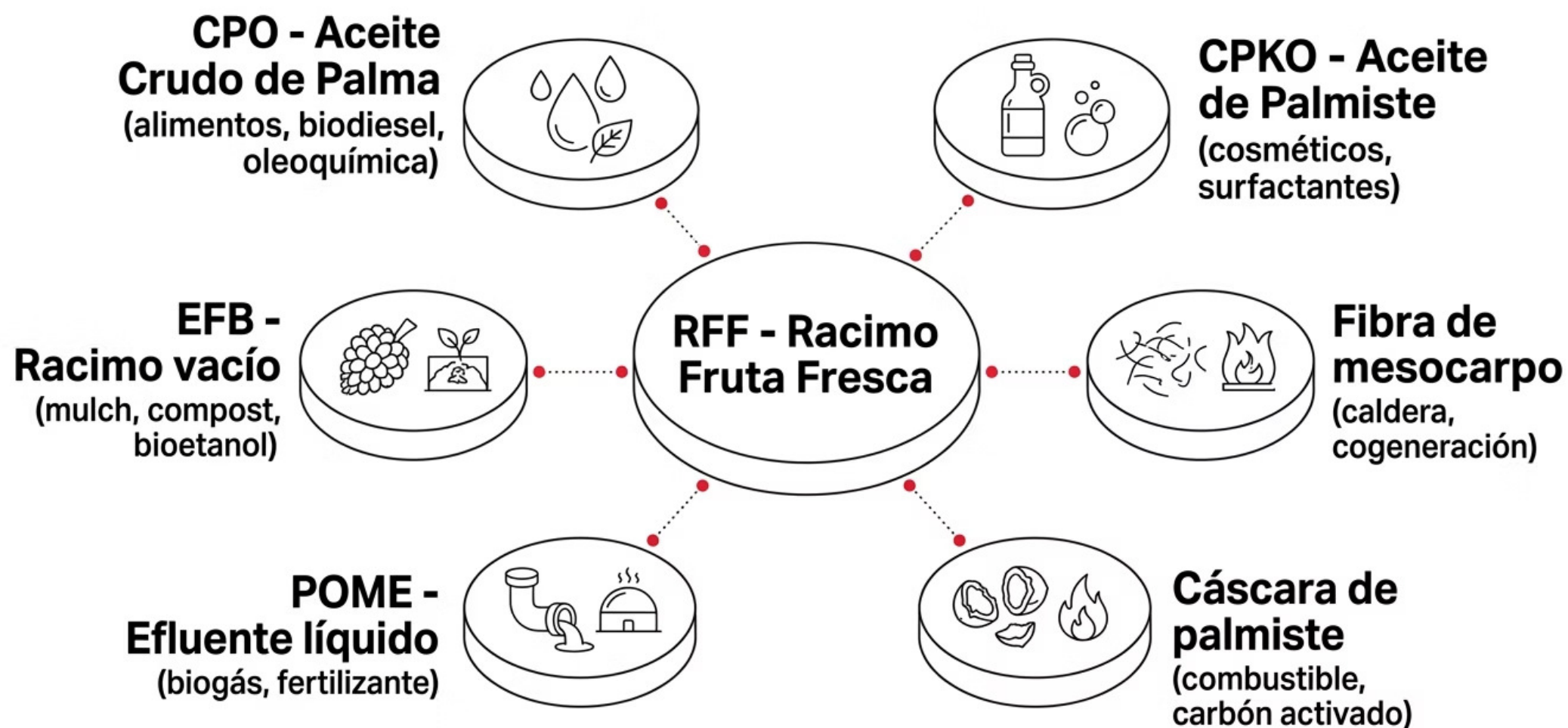
- Aceite en mesocarpo: 45–55% base seca
- Aceite en palmiste: 48–52% base seca
- Rendimiento de aceite crudo (CPO): 20–22% sobre RFF
- Rendimiento de aceite de palmiste (CPKO): 2–3% sobre RFF

 Referencia: Corley & Tinker, *The Oil Palm*, 5.ª ed., Wiley-Blackwell, 2016.



Mapa de Productos y Subproductos de la Biorrefinería

La biorrefinería de palma aceitera genera una amplia cartera de productos primarios y secundarios con mercado establecido o potencial energético y agronómico de alto valor.



Cada fracción del RFF tiene destino industrial definido. La integración de todos los flujos define el grado de sofisticación de la biorrefinería y su rentabilidad global.

Balance de Masa: Planta de Referencia de 60 t RFF/h

El siguiente balance corresponde a una planta de extracción de aceite de palma (PEOA) operando a capacidad nominal de **60 t/h de RFF**, condición estándar en la industria malaya e indonesia.

Entrada

- RFF: 60.000 kg/h
- Agua de proceso: ~18.000 kg/h
- Vapor vivo: ~6.000 kg/h

Productos primarios

- CPO: 12.600 kg/h (21% sobre RFF)
- CPKO: 1.500 kg/h (2,5% sobre RFF)
- Cáscara palmiste: 2.400 kg/h

Subproductos sólidos

- EFB (racimo vacío): 13.800 kg/h (23%)
- Fibra mesocarpio: 9.000 kg/h (15%)
- Lodos prensa (sludge): 1.200 kg/h

Efluentes líquidos

- POME: ~60.000 kg/h (≈ 1 t/t RFF)
- DQO típico: 50.000–80.000 mg/L
- Potencial biogás: 28 m³/t POME

📄 Fuente: Malaysian Palm Oil Board (MPOB), *Processing of Fresh Fruit Bunches*, 2020. Los valores son promedios de auditorías de planta en Pahang y Johor.

Ejemplo de Cálculo: Balance de Masa Detallado

Verificación del cierre de balance para la planta de 60 t RFF/h. Base de cálculo: 1 hora de operación en estado estacionario.

Procedimiento de cálculo (base 1 h)

1. Definición de la base: $m_{\text{RFF}} = 60.000 \text{ kg}$

2. Fraccionamiento másico:

- $\text{CPO} = 60.000 \times 0,21 = \mathbf{12.600 \text{ kg}}$
- $\text{CPKO} = 60.000 \times 0,025 = \mathbf{1.500 \text{ kg}}$
- $\text{EFB} = 60.000 \times 0,23 = \mathbf{13.800 \text{ kg}}$
- $\text{Fibra} = 60.000 \times 0,15 = \mathbf{9.000 \text{ kg}}$
- $\text{Cáscara} = 60.000 \times 0,04 = \mathbf{2.400 \text{ kg}}$
- $\text{POME} = 60.000 \times 1,0 = \mathbf{60.000 \text{ kg}}$
- Pérdidas proceso $\approx \mathbf{700 \text{ kg}}$

3. Verificación cierre: Entradas = $60.000 + 18.000 + 6.000 = 84.000 \text{ kg}$.

Salidas = $12.600 + 1.500 + 13.800 + 9.000 + 2.400 + 60.000 + \dots$ ✓ Error de cierre < 1%

Ratios de control operacional

- **OER** (Oil Extraction Rate): $\geq 21\%$ para planta eficiente
- **KER** (Kernel Extraction Rate): $\geq 2,5\%$
- **Pérdida en EFB:** $< 0,8\%$ sobre RFF
- **Pérdida en POME:** $< 0,5\%$ sobre RFF
- **Pérdida en fibra:** $< 0,4\%$ sobre RFF

✓ OER y KER son los KPIs críticos de eficiencia en cualquier auditoría de planta certificada por RSPO.

Balance de Energía y Cogeneración

La biorrefinería de palma es energéticamente autosuficiente gracias a la combustión de fibra y cáscara en calderas de biomasa acopladas a turbogeneradores de vapor. El excedente eléctrico puede exportarse a la red.

Entradas energéticas (base 1 h)

- Fibra mesocarpio: $9.000\text{ kg} \times 7,5\text{ MJ/kg} = \mathbf{67.500\text{ MJ/h}}$
- Cáscara palmiste: $2.400\text{ kg} \times 18,4\text{ MJ/kg} = \mathbf{44.160\text{ MJ/h}}$
- Biogás de POME: $28\text{ m}^3/\text{t} \times 60\text{ t} \times 21,5\text{ MJ/m}^3 = \mathbf{36.120\text{ MJ/h}}$
- **Total disponible: 147.780 MJ/h**

Consumo interno de la planta

- Vapor de proceso: $\sim 55.000\text{ MJ/h}$
- Electricidad interna: $\sim 3.600\text{ MJ/h}$ (1 MWh)
- Total consumo: $\sim 58.600\text{ MJ/h}$

Generación eléctrica y excedentes

- Caldera de biomasa: $\eta = 72\text{--}75\%$
- Turbina de vapor backpressure: $\eta = 22\text{--}25\%$
- Potencia bruta generada: $\sim 8\text{--}12\text{ MW}$
- Consumo planta: $\sim 2\text{--}3\text{ MW}$
- **Excedente exportable: 5–9 MW**

i Un generador de 60 t/h puede exportar hasta 70.000 kWh/día, con ingresos adicionales de $\sim 3.500\text{ USD/día}$ a tarifa de 0,05 USD/kWh (MPOB, 2022).



Análisis Económico: CAPEX

Los costos de capital de una biorrefinería de palma aceitera dependen fuertemente de la capacidad de procesamiento. A continuación se presenta la estimación para una planta nueva de **60 t RFF/h** con sistema de cogeneración integrado y tratamiento de POME.

Equipos principales

- Esterilizadores horizontales
- Desfrutadores y digestores
- Prensas de tornillo
- Centrífugas y clarificadores

~12–15 M USD

Sistema de cogeneración

- Caldera de biomasa (20 bar)
- Turbogenerador backpressure
- Condensadores y economizadores
- Sistemas de control DCS

~5–8 M USD

Tratamiento POME

- Lagunas anaerobias cubiertas
- Captura y quema de biogás
- Motores de biogás (opcional)
- Sistema de compostaje EFB

~3–5 M USD

Infraestructura y civil

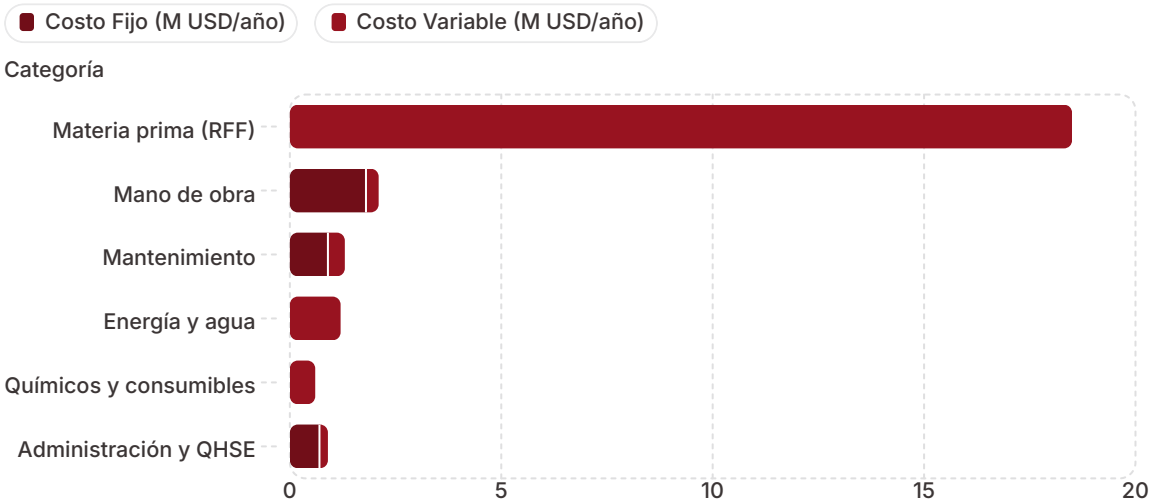
- Obra civil y estructuras
- Instalaciones eléctricas
- Pipelines y almacenamiento
- Laboratorio y QHSE

~4–6 M USD

 **CAPEX total estimado:** 24–34 M USD para 60 t/h. Factor de Lang para plantas de procesamiento de biomasa húmeda: 4,5–5,5 sobre costo de equipos. Fuente: Turton et al., *Analysis, Synthesis and Design of Chemical Processes*, 5.ª ed.

Análisis Económico: OPEX y Rentabilidad

El costo operacional anual es el principal determinante de la rentabilidad. La eficiencia energética y el aprovechamiento de subproductos son las palancas de optimización más relevantes.



Indicadores de rentabilidad

- **OPEX total:** ~24,6 M USD/año
- **Ingresos CPO** ($12.600 \text{ kg/h} \times 8.400 \text{ h/año} \times 0,75 \text{ USD/kg}$): ~79,4 M USD/año
- **Ingresos CPKO + subproductos:** ~8 M USD/año
- **EBITDA estimado:** ~63 M USD/año
- **Payback simple:** 3–5 años
- **TIR** (10 años, precio CPO 750 USD/t): **22–28%**

❏ Precio CPO referencia: MPOB, promedio 2022–2023. Análisis de sensibilidad recomendado $\pm 20\%$ precio CPO.

Caso de Estudio 1: Planta Sime Darby — Malaysia

Sime Darby Plantation opera una de las redes de PEOA más eficientes del mundo. La planta de Carey Island (Selangor) procesa **90 t RFF/h** con certificación RSPO y sistema de biogás capturado desde 2014.

Datos técnicos de la instalación

- Capacidad: 90 t RFF/h (720.000 t/año)
- OER real: 21,8% (benchmark industria: 20–21%)
- KER real: 2,61%
- Cogeneración: 12 MW instalados, 7 MW exportados
- Sistema biogás POME: captura > 85%
- Reducción GEI verificada: 62.000 t CO₂eq/año

Resultados económicos reportados

- CAPEX biogás: 4,2 M USD (VCS Verra Project 1438)
- OPEX biogás: 0,38 M USD/año
- Ingresos carbono (VCU): ~1,2 M USD/año
- Ingresos electricidad exportada: ~3,2 M USD/año
- Payback proyecto biogás: 3,1 años

✓ El proyecto biogás fue validado por DNV-GL bajo el estándar VCS (Verified Carbon Standard). Fuente: Sime Darby Sustainability Report, 2023.

Caso de Estudio 2: Palmeras de los Llanos — Colombia

Palmeras de los Llanos S.A. (Meta, Colombia) es uno de los casos más documentados de biorrefinería integrada en América Latina, con valorización completa del EFB y producción de bioetanol de segunda generación.

Configuración de la biorrefinería

- Capacidad: 45 t RFF/h (360.000 t/año)
- Planta oleoquímica integrada: jabones y glicerina
- Pretratamiento EFB: hidrólisis enzimática piloto
- Producción de compost: 22.000 t/año
- Certificación RSPO + Bonsucro (bioetanol)

Indicadores de eficiencia

- OER: 21,3% | KER: 2,48%
- Valorización EFB: 95% del flujo generado
- Intensidad de agua: 0,8 m³/t RFF (vs. media 1,2)

Lecciones aprendidas

- La hidrólisis enzimática de EFB requiere pretratamiento alcalino para alcanzar conversión > 70%
- El compostaje de EFB reduce costos de fertilización en campo en ~18 USD/ha/año
- La integración oleoquímica añade ~12 USD/t RFF al margen bruto
- La certificación RSPO habilitó acceso a mercado europeo con sobreprecio del 4–6%

📄 Fuente: Fedepalma, *Anuario Estadístico 2023*; comunicación técnica interna, 2022.

Ejemplo de Cálculo: Estimación CAPEX por Factor de Lang

El método de factores de Lang permite estimar rápidamente el CAPEX de una planta a partir del costo de equipos principales. Es ampliamente utilizado en estudios de factibilidad Clase III ($\pm 30\%$ de precisión).

Procedimiento de estimación (planta 60 t/h)

Paso 1: Cotización de equipos principales (C_{eq}):

- Esterilizadores ($3 \times 7,5$ t): 1,8 M USD
- Prensas lbau (4×15 t/h): 2,4 M USD
- Centrífugas decaners (2×30 t/h): 1,2 M USD
- Caldera biomasa 20 t/h vapor: 2,1 M USD
- Turbogenerador 8 MW: 1,9 M USD
- Subtotal C_{eq} = 9,4 M USD**

Paso 2: Aplicación del Factor de Lang ($f_L = 5,0$ para procesos fluidos-sólidos mixtos):

$CAPEX_{estimado} = f_L \times C_{eq} = 5,0 \times 9,4 = \mathbf{47\ M\ USD}$

Paso 3: Contingencia (15%): **+7,1 M USD**

CAPEX total con contingencia: ~54 M USD

Factores del método Lang

Tipo de planta	f_L
Sólidos	3,9
Sólidos-fluidos	4,6
Fluidos	4,8
Con biomasa húmeda	5,0–5,5

⚠ El factor de Lang subestima costos en países con infraestructura limitada. Aplicar corrección de localización: $f_{loc} = 1,15\text{--}1,35$ para Colombia, Indonesia y Nigeria.

Oportunidades de Valorización y Tendencias Futuras

La biorrefinería de palma aceitera de próxima generación integra oleoquímica avanzada, biocombustibles de segunda generación y economía circular completa del residuo sólido.



Biodiésel y HVO

El CPO es materia prima preferida para FAME-biodiésel y HVO (aceite vegetal hidrotratado). El HVO de palma cumple los umbrales RED II de la UE con reducción de GEI del 50–85% vs. diésel fósil.



Oleoquímica de especialidad

Fraccionamiento de CPO produce estearinas, oleínas, ácidos grasos, glicerina y ésteres especiales para farmacia, cosmética e industria química. Valor añadido: +40–60% sobre CPO crudo.



Bioetanol 2G desde EFB

La celulosa del EFB (40% en base seca) puede hidrolizarse y fermentarse para producir bioetanol. Rendimiento teórico: 180–220 L/t EFB. Aún en fase piloto/demostrativa a nivel industrial.

Conclusiones y Recomendaciones para Ingenieros de Procesos

La biorrefinería de palma aceitera representa uno de los sistemas agroindustriales más complejos y rentables del sector biomasa. Su correcta ingeniería de procesos es determinante para la viabilidad económica y ambiental del sistema.

Optimización del balance de masa

El OER y KER son los KPIs críticos. Una mejora de +0,5% en OER sobre 60 t/h equivale a ~252 t CPO adicional/año (~189.000 USD/año a 750 USD/t). Priorizar mantenimiento de prensas y temperatura de digestores (90–95°C).

Integración energética (Pinch Analysis)

Aplicar análisis Pinch para maximizar recuperación de calor entre corrientes de proceso. Potencial de reducción de consumo de vapor: 10–15%. Herramientas recomendadas: Aspen Energy Analyzer, HYSYS Utilities.

Gestión del POME como activo

Tratar el POME como fuente de biogás (28 m³/t) y fertilizante orgánico, no como pasivo ambiental. La captura de biogás puede generar créditos de carbono (10–15 USD/t CO₂eq) en mercados VCS o Gold Standard.

Criterio de escalabilidad CAPEX

Escalar capacidad usando la regla de los 0,6: $CAPEX_2 = CAPEX_1 \times (Cap_2/Cap_1)^{0,6}$. Duplicar capacidad de 30 a 60 t/h no duplica el costo: incremento estimado del 52%. Economías de escala significativas hasta ~90 t/h.

Bibliografía y Referencias Técnicas

Las siguientes fuentes constituyen la base documental de esta presentación. Se incluyen referencias normativas, técnicas e institucionales de primer nivel para la ingeniería de procesos de palma aceitera.

Libros y manuales técnicos

- Corley, R.H.V. & Tinker, P.B. (2016). *The Oil Palm*, 5th ed. Wiley-Blackwell.
- Turton, R. et al. (2018). *Analysis, Synthesis and Design of Chemical Processes*, 5th ed. Prentice Hall.
- Chow, M.C. (1991). *Good Milling Practice Guide for Palm Oil Mills*. PORIM.
- Smith, R. (2016). *Chemical Process Design and Integration*, 2nd ed. Wiley.

Instituciones y reportes sectoriales

- MPOB (2023). *Malaysian Palm Oil Statistics*. Malaysian Palm Oil Board.
- Fedepalma (2023). *Anuario Estadístico de la Agroindustria de la Palma Aceitera en Colombia*.
- RSPO (2023). *RSPO Principles and Criteria*, 2018 revision.

Artículos científicos indexados

- Lam, M.K. et al. (2019). "Palm oil biorefinery: a review of technology and economics." *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 13(3), 658–680. DOI: 10.1002/bbb.1979
- Mohammed, N. et al. (2021). "POME biogas capture and utilization: A techno-economic review." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 145, 111086.
- Ng, W.P.Q. et al. (2012). "Process integration and optimization of palm oil mill." *Journal of Cleaner Production*, 34, 57–67.

Estándares y normas

- ISO 14064-1:2018 — Cuantificación de GEI
- EN 14214:2012 — Especificación FAME biodiésel
- VCS Standard v4.0 — Verra (2021)

 Todas las referencias están disponibles en acceso abierto a través de ResearchGate, MPOB Open Access Portal y Fedepalma Digital Library. Se recomienda complementar con las publicaciones anuales de IOPRI (Indonesia) y CIRAD (Francia).