

Análisis de Ciclo de Vida

Un Ejemplo Ilustrativo de la Producción de Electricidad

Presentado por Gustavo Larrea-Gallegos

October 27, 2025

Esquema

- ① Introducción al Análisis de Ciclo de Vida (ACV)
- ② Fase 1: Definición del Objetivo y Alcance
- ③ Fase 2: Inventario de Ciclo de Vida (ICV)
- ④ Fase 3: Evaluación de Impacto de Ciclo de Vida (EICV)

Qué es el ACV?

- Un método sistemático para evaluar los impactos ambientales de un producto, proceso o servicio a lo largo de todo su ciclo de vida.
- A menudo se le conoce como un análisis "de la cuna a la tumba" o "de la cuna a la cuna".
- Se basa en una unidad funcional para asegurar una comparación justa.
- Proporciona un marco matemático riguroso para el ACV.

Objetivo y Alcance de Nuestro Ejemplo

- **Objetivo:** Ilustrar la metodología del ACV evaluando los potenciales impactos ambientales de la producción de electricidad.
- **Unidad Funcional:** 1 kWh de electricidad entregada al consumidor.
- **Límites del Sistema:**
 - Extracción de petróleo crudo
 - Transporte de petróleo crudo
 - Refinación del petróleo para producir combustible
 - Generación de electricidad en una central eléctrica
- **Categorías de Impacto Consideradas:** Potencial de Calentamiento Global (PCG).

Procesos Unitarios y Flujos

Nuestro sistema simplificado consiste en los siguientes procesos unitarios:

- 1 Producción de Electricidad:** El proceso central. Para producir 1000 kWh de electricidad, se requieren 200 litros de combustible.
- 2 Producción de Combustible:** Se asume que requiere petróleo crudo como insumo principal.
- 3 Extracción de Petróleo Crudo:** Se asume que tiene insumos de energía y emisiones ambientales asociadas.

Usaremos datos hipotéticos pero plausibles para este ejemplo ilustrativo.

Desglosando el ICV: Matrices y Vectores

- **Matriz Tecnológica (A):** Esta matriz representa los flujos económicos y técnicos dentro del sistema.
 - Cada columna representa un proceso unitario.
 - Cada fila representa un flujo de producto.
 - Los valores cuantifican las entradas (negativas) y salidas (positivas) de productos para cada proceso.
- **Matriz de Intervención (B):** Esta matriz registra los intercambios con el medio ambiente.
 - Las columnas corresponden a los procesos unitarios.
 - Las filas representan flujos ambientales (emisiones, extracciones de recursos).
- **Vector de Demanda Final (f):** Este vector especifica la salida deseada del sistema, nuestra unidad funcional.
- **Vector de Escalado (s):** Este vector se calcula para determinar cuánto necesita operar cada proceso para satisfacer la demanda final.

Matriz Tecnológica (A)

La matriz tecnológica describe los flujos entre procesos. Las filas y columnas representan procesos. Una entrada A_{ij} es la entrada del proceso i para producir una unidad de salida del proceso j .

	Prod. Elec.	Prod. Comb.	Extr. Petr.
Prod. Elec. (kWh)	1000	0	0
Prod. Comb. (L)	-200	1	0
Extr. Petr. (L)	0	-1.2	1

Matriz de Intervención (B)

La matriz de intervención detalla los intercambios con el medio ambiente (emisiones y extracciones de recursos). Las filas representan los flujos ambientales y las columnas los procesos.

	Prod. Elec.	Prod. Comb.	Extr. Petr.
CO ₂ (kg)	500	50	20
Petróleo Crudo (L)	0	0	-1

(Datos hipotéticos para ilustración)

El Cálculo Central: Álgebra Matricial

La ecuación fundamental del Inventario de Ciclo de Vida es:

$$g = B \cdot A^{-1} \cdot f$$

Donde:

- g es el vector de inventario ambiental resultante.
- B es la matriz de intervención.
- A^{-1} es la inversa de la matriz tecnológica, que representa los requerimientos totales de cada proceso.
- f es el vector de demanda final.

Esto es equivalente a resolver el sistema de ecuaciones lineales: $A \cdot s = f$, y luego calcular $g = B \cdot s$.

Sistema de Ecuaciones Equivalente

Denotemos los factores de escalado para la Producción de Electricidad, Producción de Combustible y Extracción de Petróleo como s_E , s_F y s_P respectivamente. La ecuación $A \cdot s = f$ se traduce en:

$$1000 \cdot s_E + 0 \cdot s_F + 0 \cdot s_P = 1 \quad (\text{kWh de Electricidad})$$

$$-200 \cdot s_E + 1 \cdot s_F + 0 \cdot s_P = 0 \quad (\text{Litros de Combustible})$$

$$0 \cdot s_E - 1.2 \cdot s_F + 1 \cdot s_P = 0 \quad (\text{Litros de Petróleo Crudo})$$

Resolver este sistema nos da el vector de escalado s , que nos dice cuánto debe escalar cada proceso para entregar 1 kWh de electricidad.

Calculando el Inventario ($s = A^{-1}f$)

- **f (Vector de Demanda Final):** Queremos 1 kWh de electricidad, entonces $f = [1, 0, 0]^T$.
- **A^{-1} (Inversa de la Matriz Tecnológica):** Representa la producción total requerida de cada proceso para entregar la demanda final.
- **s (Vector de Escalado):** $s = A^{-1}f$ proporciona el escalado necesario para cada proceso.
- **g (Inventario Ambiental):** $g = B \cdot s$ calcula el total de intervenciones ambientales.

Caracterización

Evaluaremos el Potencial de Calentamiento Global (Global Warming Potential) multiplicando las emisiones de CO₂ por su factor de caracterización. Para el CO₂, el factor de PCG es 1 kg CO₂-eq/kg.

- Supongamos que el total de emisiones de CO₂ calculado del inventario (g_{CO_2}) es de 600 kg.
- El PCG total sería:

$$PCG = 600 \text{ kg CO}_2 \times 1 \frac{\text{kg CO}_2\text{-eq}}{\text{kg CO}_2} = 600 \text{ kg CO}_2\text{-eq}$$

Matriz de Caracterización (Q)

La Matriz de Caracterización (Q) describe el factor de caracterización de cada flujo ambiental. Las filas categorías de impacto mientras que las columnas representan nodos de la biosfera.

	CO ₂	Petróleo Crudo (L)
GWP	1	0
Agot. de Rec.	0	1
Estrés hídrico	0	0

Cálculo de impactos

Una vez calculado los inventarios de emisiones, el vector de impactos final se calcula con esta ecuación:

$$h = Q \cdot g$$

Donde:

- Q es la matriz de factores de caracterización
- g es el inventario ambiental.
- h es el vector de impactos final.