

Optimización del Sector Eléctrico

Problema de Expansión de Capacidad (GEP) y Programación Entera

AAB

Circe

19 de octubre de 2025

Enunciado del Problema: Tarea de Programación Entera

Objetivo de la Actividad

La actividad consiste en **modelar y resolver un problema real** que corresponde a las decisiones tomadas en el sector eléctrico.

- El problema en la literatura se conoce como **Problema de Expansión de la Capacidad (GEP)**, por sus siglas en inglés: *Generation Expansion Planning*.
- Se requiere la formulación como un caso de **Programación Entera** (o Mixta Entera) para determinar la inversión óptima en nuevas plantas de generación (MW).

Referencia Principal para Detalles

Valdés García, E. (2019). Metodología multiobjetivo para el problema de expansión de la capacidad de generación eléctrica.

Introducción al Problema GEP

- Es un problema de **Programación Entera** (o Mixta Entera) central para la toma de decisiones en el sector eléctrico.
- **Objetivo General:** Determinar la cantidad de nuevas plantas de generación (MW) a instalar para cubrir la demanda futura.
- **Contexto:** Decisiones a largo plazo (horizonte 2032) en la región de control Noreste de México (10 regiones de transmisión).

Justificación: Economía vs. Ambiente

- Las decisiones deben equilibrar la **reducción de costos** y la **disminución de Gases de Efecto Invernadero (GEI)**.
- **Tecnologías Convencionales (Contaminantes):**
 - Carboeléctrica, Ciclo combinado, Combustión interna, Termoeléctrica, Turbogás.
 - Son la opción más **económica**.
- **Tecnologías Renovables (Cero GEI):**
 - Eólica, Hidroeléctrica, Solar.
 - Son esenciales para los compromisos climáticos (Acuerdos de París).

Datos Clave y Horizonte de Optimización

- **Región de Estudio:** Región Noreste del SEN (Regiones 12 a 21).
- **Horizonte:** Decisión de inversión a realizar para cubrir la demanda hasta el año **2032**.
- **Demanda Requerida:** La generación total debe ser al menos 89,917,974 MWh.

Conceptos de Energía

- **Capacidad (MW):** Potencial máximo de producción de una planta (variable $TotCap_{it}$).
- **Generación (MWh):** Nivel real de producción eléctrica en un periodo (variable Gen_{it}).

1. Conjuntos y Variables de Decisión

- **Conjunto de Regiones (I):** $\{12, 13, \dots, 21\}$ (10 regiones del Noreste).
- **Conjunto de Tecnologías (T):** $\{1, 2, \dots, 8\}$ (8 tipos de plantas).

Variables de Decisión

- **Primaria:** $NewCap_{it} \in \mathbb{N} \cup \{0\}$: Cantidad de nuevas plantas del tipo t a instalar en la región i .

Variables de Estado (Auxiliares)

- $TotCap_{it} \in \mathbb{R}^+$: Capacidad total instalada a 2032 (MW).
- $Gen_{it} \in \mathbb{R}^+$: Generación eléctrica anual de la planta t en la región i (MWh).

2. Funciones Objetivo (Alternativas)

El problema puede resolverse minimizando el impacto ambiental o el impacto económico.

Objetivo Principal: Minimizar Emisiones de GEI

$$\min \sum_{i \in I} \sum_{t \in T} GHGEmi_t \cdot Gen_{it}$$

Donde $GHGEmi_t$ es la emisión (ton/MWh) por tecnología.

Objetivo Alternativo: Minimizar Costos

$$\min \sum_{i \in I} \sum_{t \in T} (NewCapCos_t \cdot MeanCap_t \cdot NewCap_{it} + GenCos_t \cdot Gen_{it})$$

Incluye costos de instalación (MW \times Nuevas Plantas) y costos de operación (MWh).

3. Restricciones Clave

1. Cumplimiento de la Demanda (2032)

- La generación total en todas las regiones debe superar la demanda:

$$\sum_{i \in I} \sum_{t \in T} Gen_{it} \geq 89,917,974 \quad (\text{MWh})$$

2. Definición de Capacidad Total ($\forall i, t$)

- Relaciona la capacidad existente con la nueva instalación:

$$TotCap_{it} = ExiCap_{it} + MeanCap_t \cdot NewCap_{it}$$

3. Límite Biofísico ($\forall i, t$)

- La capacidad total no debe exceder la capacidad disponible por recursos:

$$TotCap_{it} \leq CapAva_{it}$$

Restricción de Generación Máxima

- La energía que puede generar una planta está limitada por su capacidad instalada y el **Factor de Máxima Generación** ($MaxGen_t$).
- Se considera la generación durante las 8,760 horas de un año no bisiesto.

Restricción de Generación Máxima ($\forall i, t$)

$$Gen_{it} \leq 8760 \cdot MaxGen_t \cdot TotCap_{it}$$

- Esta restricción asegura que la generación calculada sea físicamente posible dadas las limitaciones operacionales (ej. plantas solares).

Solución Óptima: Minimizar Emisiones

- **Valor Objetivo (Emisiones):** 15,662,955 ton.
- **Costo Asociado:** \$33,056,240,952.64.
- **Preferencia Tecnológica:** El modelo favorece las **renovables** (cero GEI).

Plantas Instaladas (Min. Emisiones)

| Tecnología | Total Instaladas | Tipo |
|------------------------|------------------|--------------|
| Solar | 580 | Renovable |
| Eólica | 145 | Renovable |
| Ciclo Combinado (2) | 18 | Convencional |
| Combustión Interna (3) | 12 | Convencional |
| Turbogás (8) | 15 | Convencional |

- Más de la mitad de las nuevas instalaciones son **solares**.
- Se logra el cumplimiento de la demanda apoyándose fuertemente en la **energía limpia**.

Solución Óptima: Minimizar Costos

- **Valor Objetivo (Costo):** \$278,996,015.77.
- **Contaminación Asociada:** 38,421,722,42 ton.
- **Preferencia Tecnológica:** El modelo muestra que **no se realiza ninguna instalación nueva**.

Plantas Instaladas (Min. Costo)

- **Total de nuevas plantas instaladas: 0.**
- La demanda se cubre únicamente con la **capacidad existente (ExiCap)**.

Análisis Comparativo: Trade-off

Minimizar Costos

- **Costo:** Mínimo (Referencia).
- **Emisiones:**
 $\approx 38,4$ millones de ton.
- **Estrategia:** Usar solo capacidad existente (evitar costos de instalación).
- **Resultado:** Alta dependencia de tecnologías contaminantes ya instaladas.

Minimizar Emisiones

- **Emisiones:** Mínimo ($\approx 15,7$ millones de ton).
- **Costo:** Mayor ($\approx \$33$ billones).
- **Estrategia:** Invertir fuertemente en **Eólica y Solar**.
- **Resultado:** Se reduce la contaminación a menos de la mitad, a costa de una gran inversión.

- El modelo permite comparar estrategias bajo criterios económicos y ambientales.
- Existe un claro trade-off entre costo e impacto ambiental.
- La política de expansión óptima depende de los objetivos regulatorios y compromisos climáticos.