

# 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

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

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	<b>580</b>	Renovable
Eólica	<b>145</b>	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:**  
≈ 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.

# Conclusiones

- 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.