



# Modelos generación/red

**Michel Rivier**

**Francisco Javier Rubio**

**Andrés Ramos**

# Fuentes del material

---

- Master en *Gestión Técnica y Económica en el Sector Eléctrico* dirigido por José Ignacio Pérez Arriaga y coordinado por Pedro Linares
  - Curso de *Modelos de sistemas de energía eléctrica* de Andrés Ramos y Julián Barquín
  - Curso de *Los negocios de transporte y distribución de energía eléctrica* de Michel Rivier y Francisco Javier Rubio

# Contenido

---

- Motivación
- Aplicaciones
- Modelos probabilistas de explotación
- Planificación de la red de transporte
- Formulación matemática
- Algunos modelos

# Motivación

---

- Proporcionar una medida de lo que es posible plantear con la ayuda de una **herramienta**
  - **potencialidades y limitaciones**
- Familiarizarse con las **técnicas de modelado de la red**
- Proporcionar **soporte matemático**

# Aplicaciones LP

---

- Largo plazo
  - Planificación de la expansión de la red
  - Selección y evaluación de inversiones
  - Impacto sobre el equipo generador / consumo
  - Interconexiones

# Aplicaciones MP

---

- Medio plazo
  - Entorno tradicional
    - planificación de la operación
    - estudios de comportamiento de la red
    - estudios de fiabilidad / adecuación
    - mantenimiento
  - ATR o competencia abierta
    - comprobar viabilidad técnica de las transacciones
    - calcular peajes de red
    - asignación de costes de red
    - estudios remuneración de la red
    - valoración de contratos de red

# Aplicaciones CP

---

- Corto plazo
  - Decisiones de operación de la red
  - Comprobación de la viabilidad técnica del despacho de generación y consumo
  - Cálculo de los precios marginales nodales
  - Identificación y valoración de las pérdidas
  - Identificación y valoración de servicios complementarios de carácter zonal o local

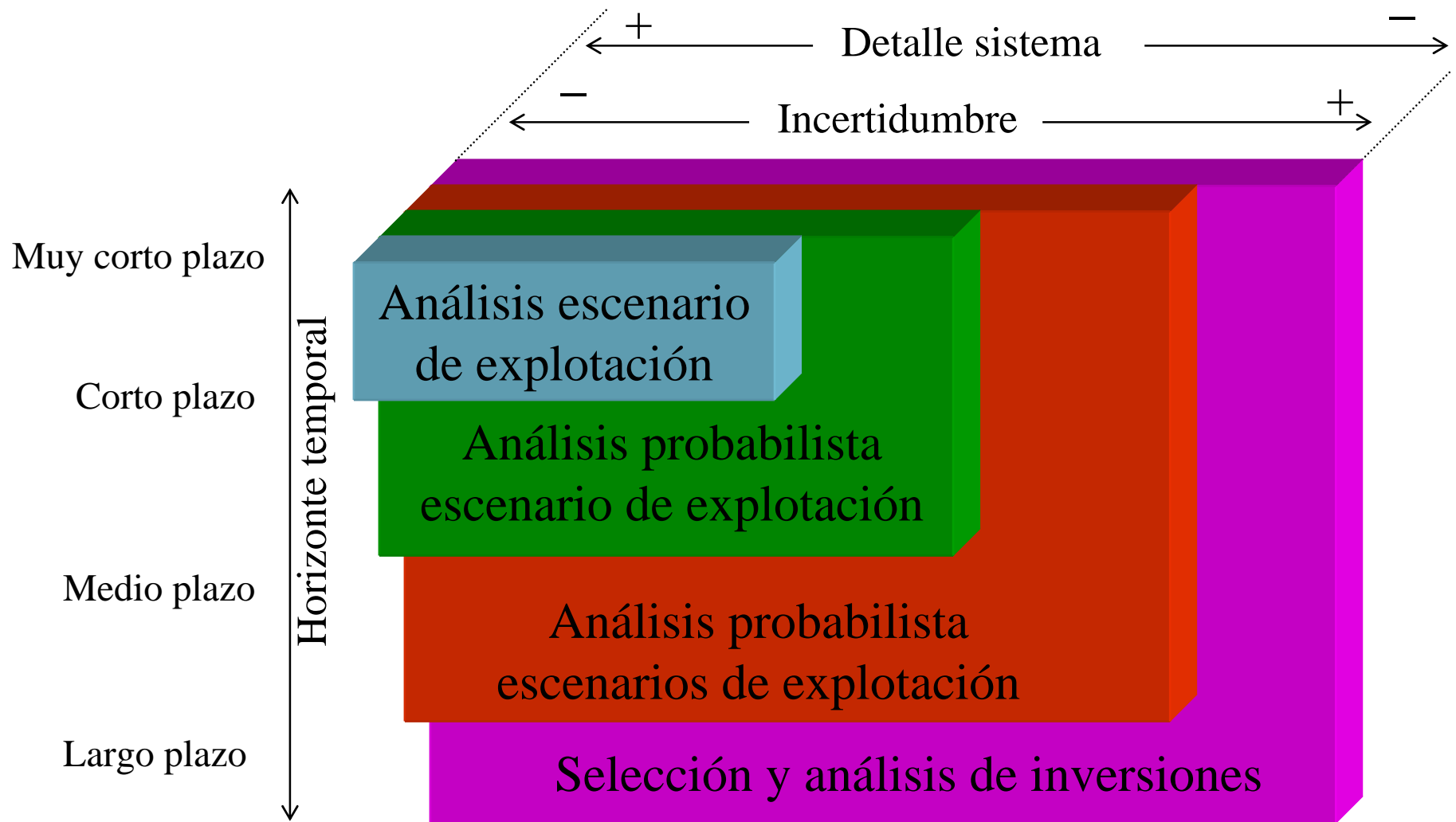
# Aplicaciones MCP

---

- Muy corto plazo
  - Análisis **estático** de la situación de la red
    - flujos
    - tensiones
  - Análisis **dinámico** de la situación de la red
    - estabilidad
    - colapso de tensiones



# Jerarquización de los modelos



# Contenido

---

- Motivación
- Aplicaciones
- Modelos probabilistas de explotación
- Planificación de la red de transporte
- Formulación matemática
- Algunos modelos

# Modelos probabilistas de explotación

---

1. Origen
2. Estructura genérica
3. Clasificación
4. Métodos
5. Aspectos de modelado

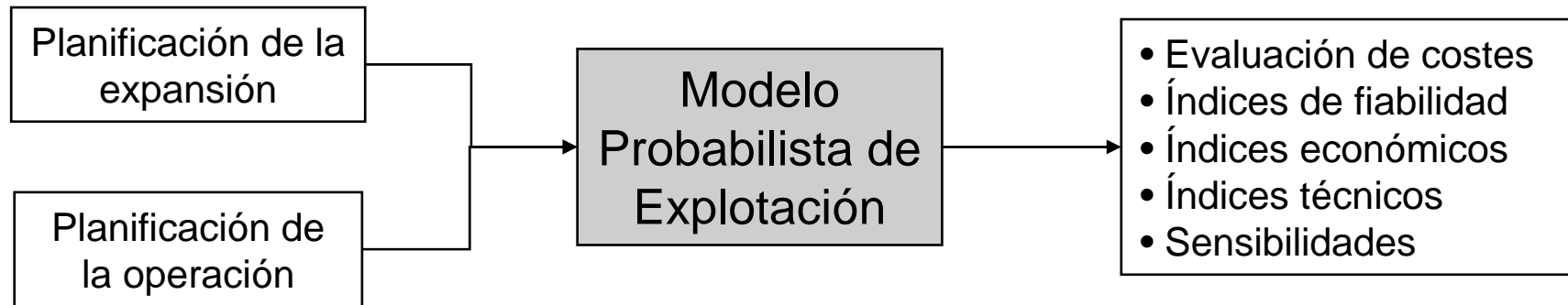
# Origen

---

- La **operación de un sistema eléctrico** es una tarea compleja.
  - Criterios económicos y de fiabilidad.
  - Tecnologías distintas.
  - Decisiones acopladas en el tiempo.
  - Incertidumbre.
  - Restricciones técnicas.
- Se requiere una **adecuada planificación de la operación**

# Origen

- Los **modelos probabilistas de explotación** son una herramienta informática de apoyo a la toma de decisiones

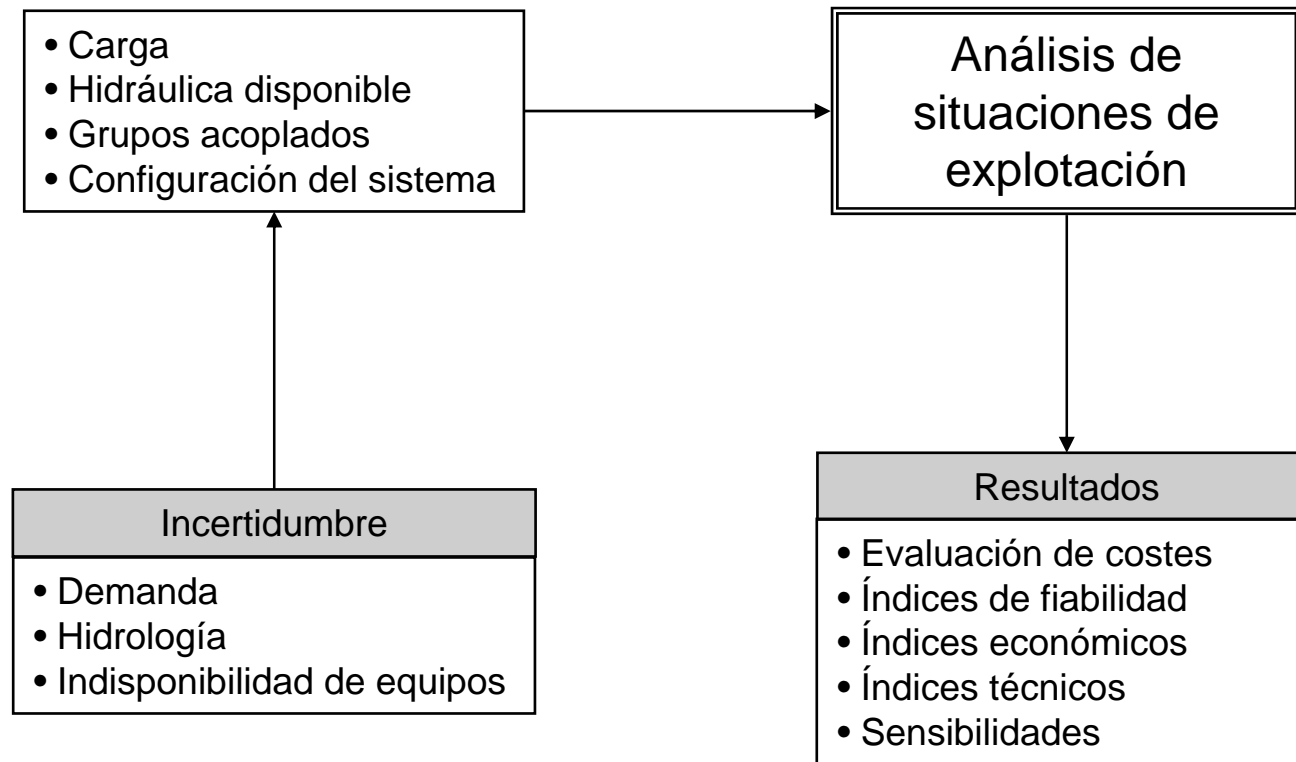


# Modelos probabilistas de explotación

---

1. Origen
2. Estructura genérica
3. Clasificación
4. Métodos
5. Aspectos de modelado

# Estructura genérica



# Modelos probabilistas de explotación

---

1. Origen
2. Estructura genérica
3. Clasificación
4. Métodos
5. Aspectos de modelado



# Clasificación

---

- Horizonte temporal.
  - Detalle de modelado del sistema.
  - Tratamiento de la incertidumbre.
  - Jerarquización de modelos.
- Optimización versus simulación
  - Precisión.
  - Flexibilidad.

# Clasificación

---

- Monoperiodo versus multiperiodo
  - Decisiones inter e intraperiodo.
  - Simulación con memoria.
  - Simulación cronológica o secuencial.
- Determinista versus probabilista

# Clasificación

---

- Nivel de **modelado de la red**.
  - Nudo único.
  - Modelo de transporte.
  - Flujo de cargas linealizado (DC).
  - Flujo de cargas linealizado con representación de las pérdidas óhmicas.
  - Flujo de cargas completo (AC).
  - Aspectos dinámicos

# Modelos probabilistas de explotación

---

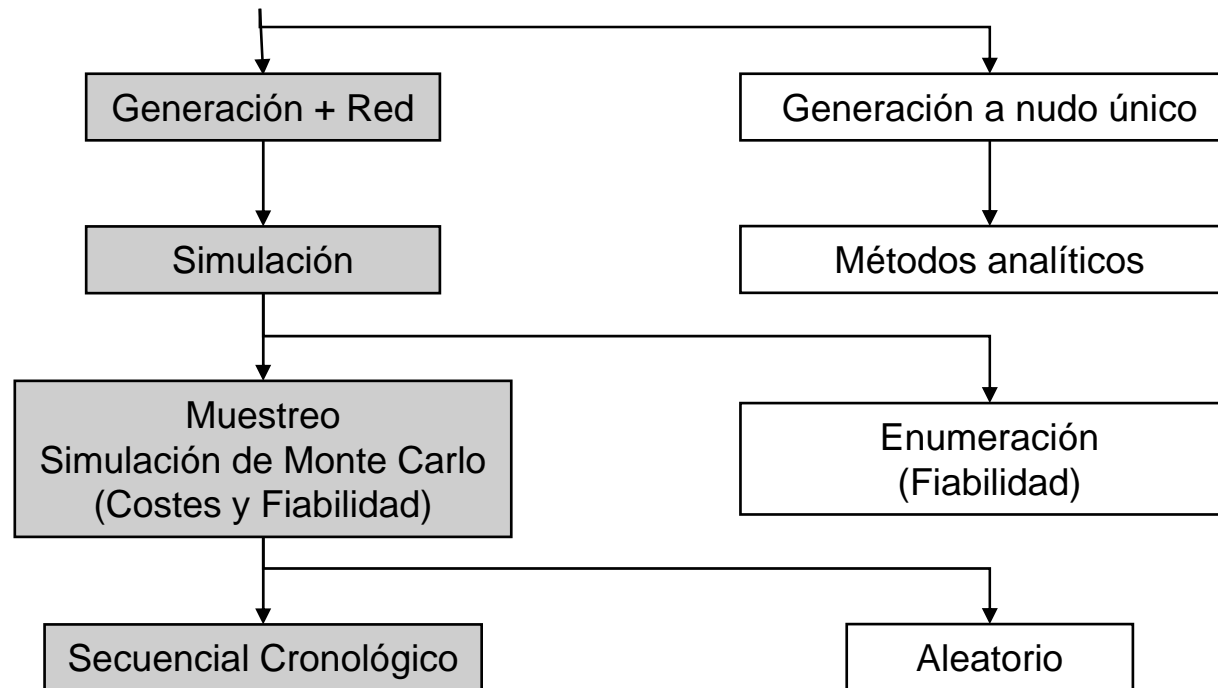
1. Origen
2. Estructura genérica
3. Clasificación
4. Métodos
5. Aspectos de modelado

# Métodos

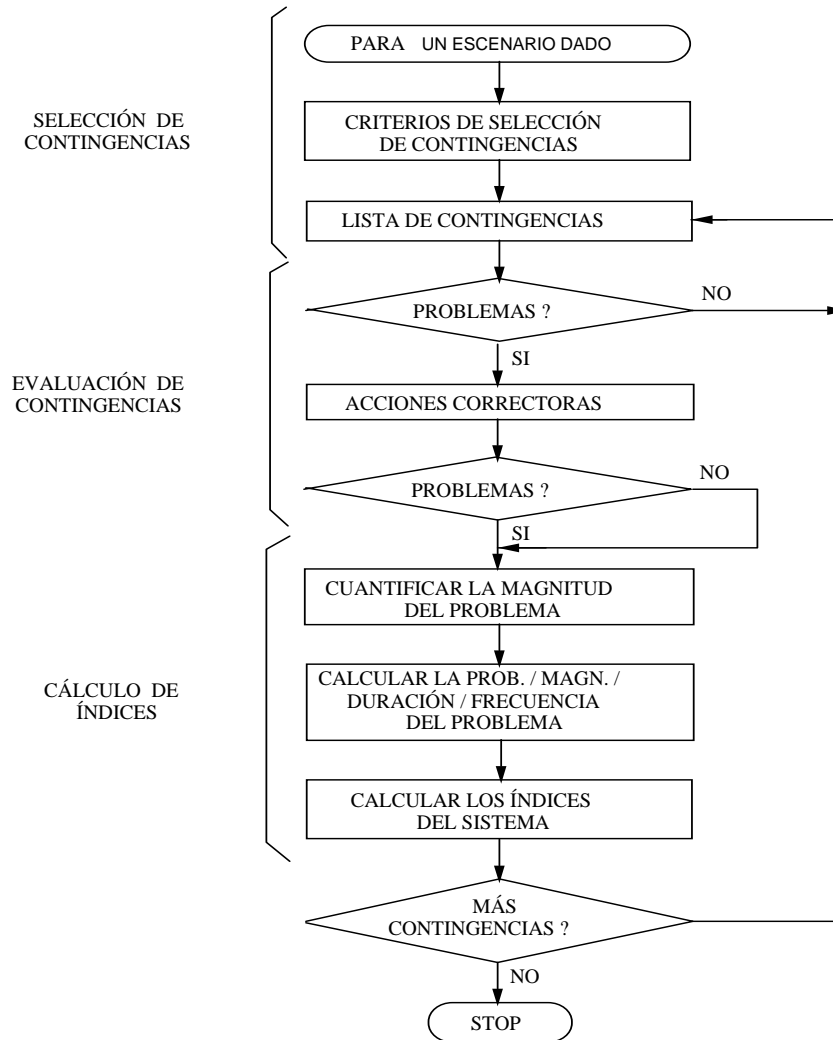
---

- Importantes desarrollos en el campo de los estudios de fiabilidad.
  - Robustez / Adecuación.
  - Considerando la red de transporte.
- Extensión a estudios de costes.

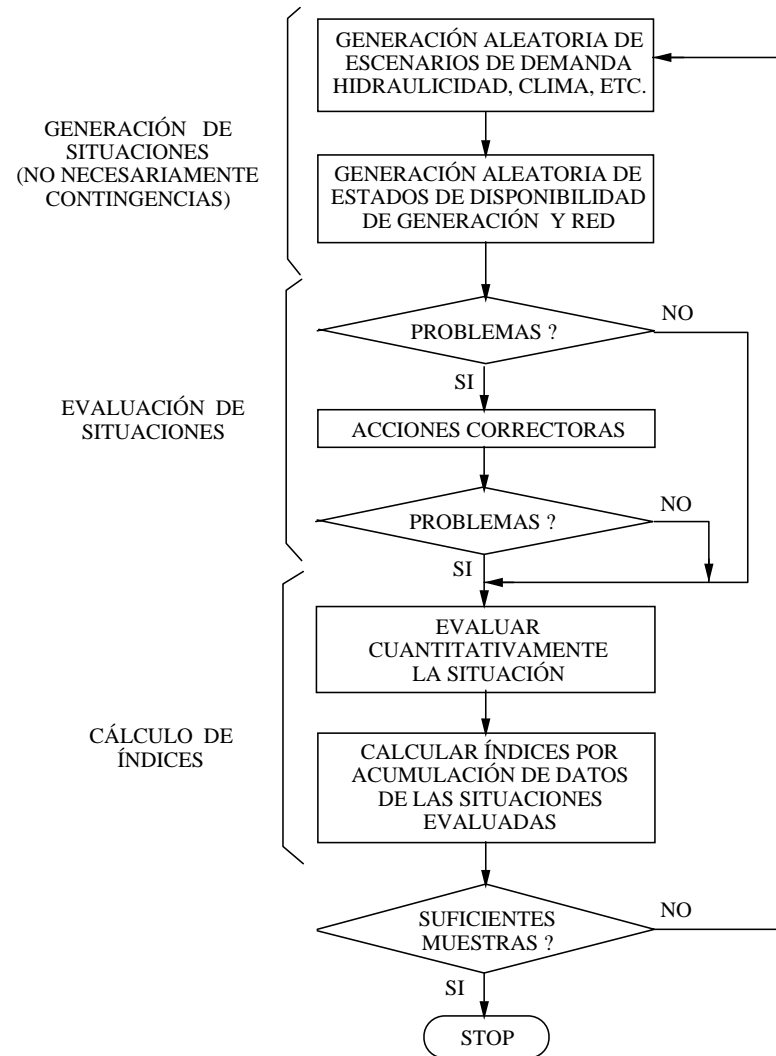
# Métodos



# Métodos

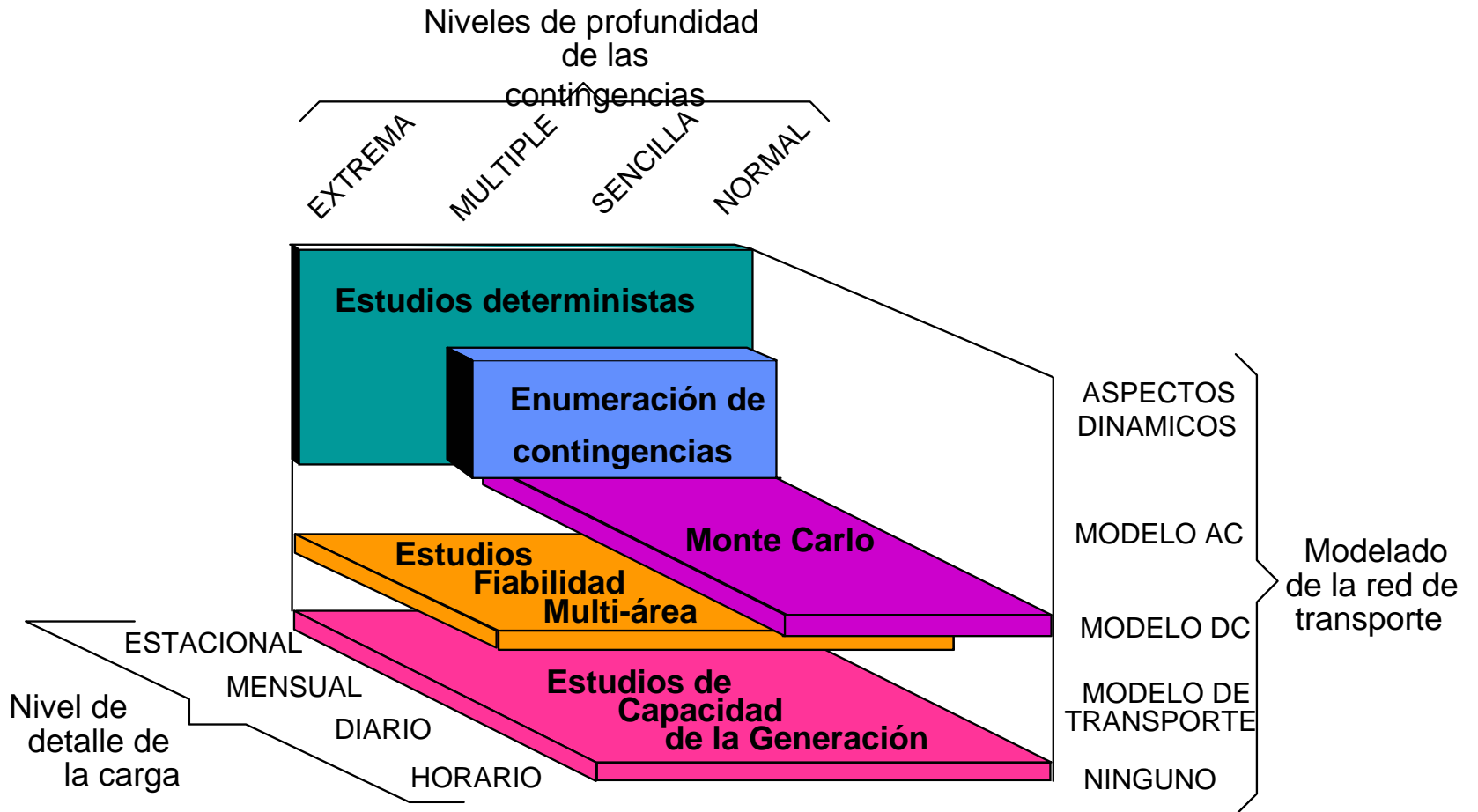


# Métodos





# Métodos



# Modelos probabilistas de explotación

---

1. Origen
2. Estructura genérica
3. Clasificación
4. Métodos
5. Aspectos de modelado

# Aspectos de modelado

---

- Generación térmica:
  - costes variables lineales / no lineales
  - mínimos técnicos
  - reservas de operación
  - conexión de los grupos: costes de arranque y parada, mínimos técnicos y reservas
  - seguimiento de carga, rampas, tiempos de arranque y parada

# Aspectos de modelado

---

- Generación hidráulica:
  - cuotas de energía
  - grupos de bombeo
  - potencias mínima (fluyente), máxima (altura), programada (modelos de orden superior), de emergencia (según ratio de capacidad embalse a potencia máxima)

# Aspectos de modelado

---

- Demanda
  - curva **duración/carga** vs. curva **carga/tiempo**.
  - curva **continua** vs. representación **por bloques**
  - **incertidumbre** de la demanda

# Aspectos de modelado

- Mantenimiento de generación y de red
  - en base a **datos históricos** (dificultad: aplicabilidad a situaciones futuras)
  - por **asignación aleatoria** (dificultad: desechar programaciones no factibles o incorrectas)
  - en **modo simulación**: histórico como referencia más reglas lógicas para resolver las situaciones que ocurran
  - **módulo exógeno** completo de programación del mantenimiento (uno para generación, otro de red) más módulo lógico que resuelva los conflictos que aparezcan (especialmente en simulación)

# Aspectos de modelado

---

- Despacho de generación
  - enfoque de **optimización**. Diversidad de algoritmos.
  - enfoque **heurístico** (reglas lógicas, estrategias prefijadas): para evitar optimización y especialmente en modo de simulación

# Aspectos de modelado

- Criterios de seguridad
  - seguridad preventiva
    - márgenes en red y/o en generación, n-1.
    - representación en el modelo de despacho (optimización global, relajación, escenarios, mercado de reservas e interrumpibilidad)
  - seguridad correctiva:
    - márgenes de respuesta de la generación
    - redistribución de carga



# Aspectos de modelado

---

- Representación realista de la explotación
  - contratos interrumpibles
  - criterios exógenos que limitan la optimalidad del despacho (e.g., cuotas de combustibles)
  - reservas
  - explotación de emergencia de la red: e.g., mallado y desmallado, reconfiguración de subestaciones
  - violación de criterios normales de seguridad preventiva en situaciones especiales (e.g., alto coste, emergencia)

# Contenido

---

- Motivación
- Aplicaciones
- Modelos de explotación generación/red
- Planificación de la red de transporte
- Formulación matemática
- Algunos modelos

# Planificación de la red de transporte

---

1. Planteamiento del problema
2. Enfoque general metodológico
3. Modelo genérico de expansión de la red
4. Criterios de planificación
5. Enfoques alternativos
6. Herramientas en la planificación
7. Nuevos planteamientos

# Planteamiento del problema

- Determinar las **ampliaciones en capacidad** de la red a realizar en el horizonte de planificación, así como su **programación temporal** de forma que
  - el sistema conjunto de generación y transporte permita **satisfacer la demanda prevista al mínimo coste**

# Planteamiento del problema

- cumpliendo los **criterios de aceptabilidad**
  - técnicos
  - fiabilidad
  - financieros
  - medioambientales
  - otros (políticos, administrativos, etc.)
- diversos **contextos posibles**
  - localización del equipo generador
  - planificación conjunta generación/red
  - planificación de la red

# Planificación de la red de transporte

---

1. Planteamiento del problema
2. Enfoque general metodológico
3. Modelo genérico de expansión de la red
4. Criterios de planificación
5. Enfoques alternativos
6. Herramientas en la planificación
7. Nuevos planteamientos

# Enfoque general metodológico

- Componentes básicos del proceso
  - previsiones como marco de referencia
    - demanda distribuida en nudos
    - expansión del equipo generador
      - > (incertidumbre) -> escenarios carga / generación
    - otras incertidumbres: hidráulicidad, indisponibilidades
  - caracterización técnico-económica de las alternativas de expansión

# Enfoque general metodológico

- Componentes básicos del proceso
  - identificación y **caracterización de los criterios** (atributos y restricciones) relevantes:
    - calidad de servicio
    - económicos y financieros
    - medioambientales
    - administrativos
    - geográficos
    - técnicos
  - adopción de un **procedimiento para la selección de alternativas**

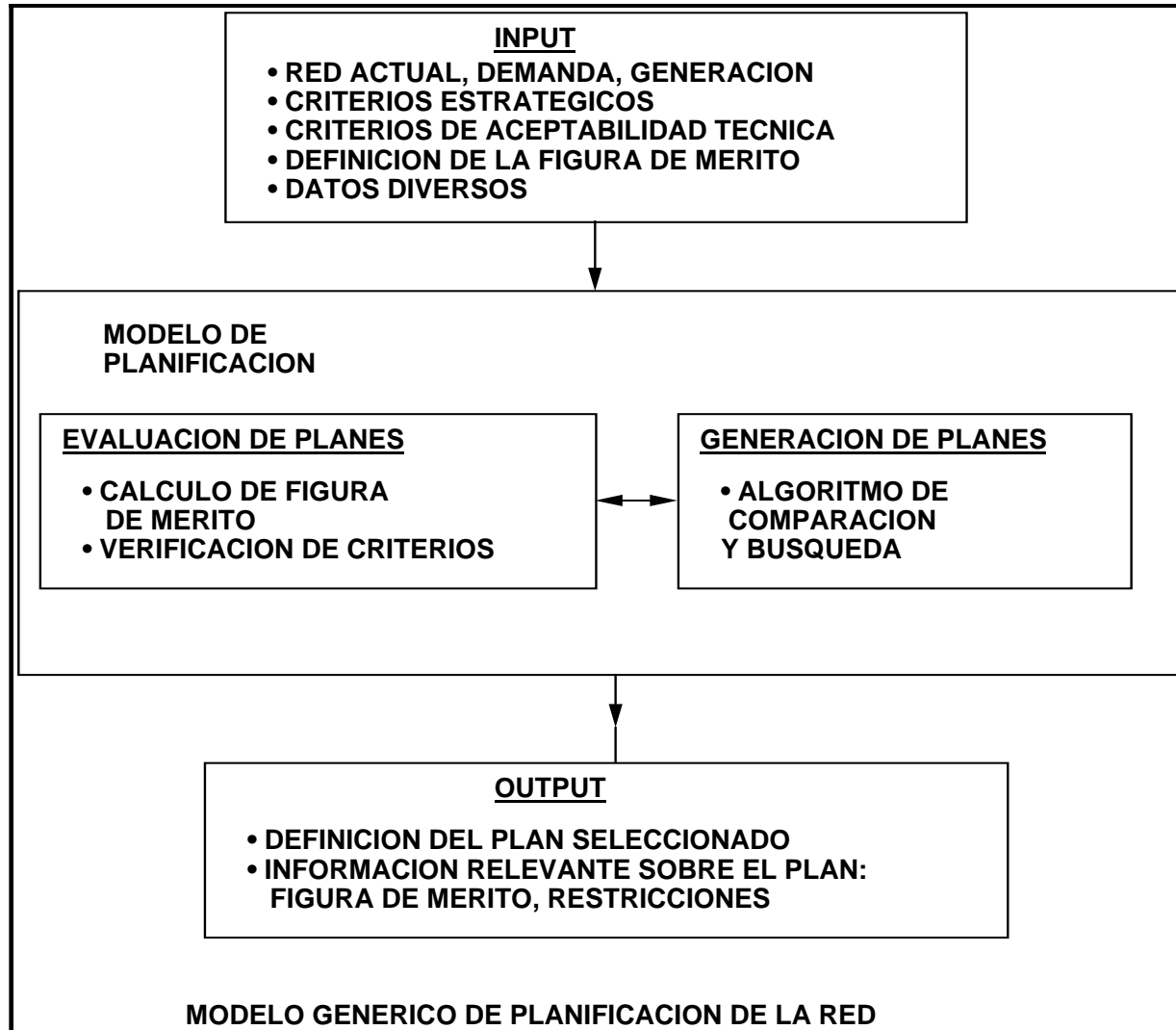


# Planificación de la red de transporte

---

1. Planteamiento del problema
2. Enfoque general metodológico
3. Modelo genérico de expansión de la red
4. Criterios de planificación
5. Enfoques alternativos
6. Herramientas en la planificación
7. Nuevos planteamientos

# Modelo genérico de expansión de la red



# Planificación de la red de transporte

---

1. Planteamiento del problema
2. Enfoque general metodológico
3. Modelo genérico de expansión de la red
4. Criterios de planificación
5. Enfoques alternativos
6. Herramientas en la planificación
7. Nuevos planteamientos

# Criterios de planificación

- Criterios de expansión: ayudan a concretar aspectos parciales concretos que:
  - restringen
  - dirigen el plan de expansión de la red dentro de la filosofía global de suministrar la energía eléctrica
    - al menor coste posible
    - con calidad de servicio satisfactoria

# Criterios de planificación

---

- Tipos de criterios:
  - criterios **estratégicos**:
    - comprenden las decisiones técnicas que afectan al diseño de la red en su conjunto
  - criterios **de fiabilidad**:
    - permiten evaluar alternativas contraponiendo los aspectos económicos y de calidad de servicio o determinar la aceptabilidad de una alternativa

# Planificación de la red de transporte

---

1. Planteamiento del problema
2. Enfoque general metodológico
3. Modelo genérico de expansión de la red
4. Criterios de planificación
5. Enfoques alternativos
6. Herramientas en la planificación
7. Nuevos planteamientos

# Enfoques Alternativos

- **Evaluación individual** técnica y económica de cada plan de expansión
  - hipótesis de red futura y escenarios definidos por el planificador
  - evaluación del comportamiento técnico y económico del sistema eléctrico:
    - modelos de cobertura generación/red
    - análisis de estabilidad, cortocircuito, etc
  - se basa en amplia experiencia

# Enfoques Alternativos

- **Análisis coste / beneficio** de alternativas de expansión
  - definir un índice de mérito (ahorros de explotación por unidad de inversión, etc)
  - ordenar las alternativas según el índice de mérito adecuado para evaluar comparativamente una alternativa concreta y como técnica de apoyo en algoritmos de selección de un plan



# Enfoques Alternativos

- Optimización del plan de expansión: función objetivo única

$$\underset{p \in P}{\text{minimizar}} \quad M(p)$$

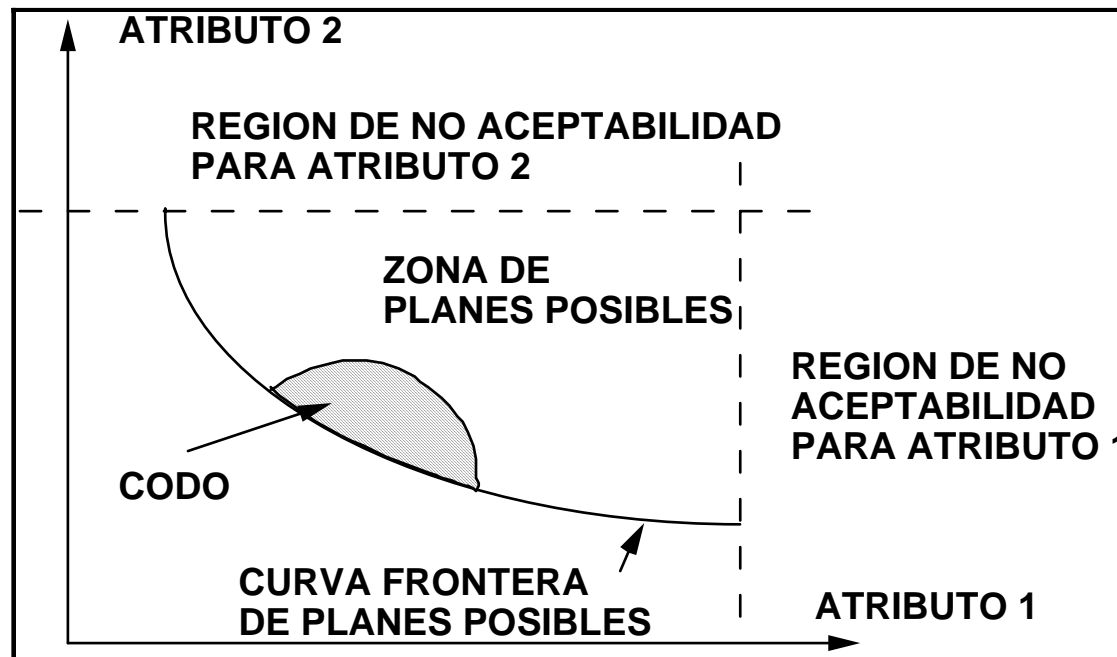
*sujeto a*

$$G_{k,\min} \leq G_k(p) \leq G_{k,\max} \quad , k = 1, \dots, K$$

- P: conjunto de todos los planes posibles
- M: índice de mérito (e.g., coste total)
- G: resultado de cada una de las K comprobaciones técnicas a las que debe someterse el plan

# Enfoques Alternativos

- Optimización multiobjetivo del plan de expansión
  - teóricamente:



- estado del arte: comparación multiobjetivo de un conjunto de planes obtenidos por enumeración

# Planificación de la red de transporte

---

1. Planteamiento del problema
2. Enfoque general metodológico
3. Modelo genérico de expansión de la red
4. Criterios de planificación
5. Enfoques alternativos
6. Herramientas en la planificación
7. Nuevos planteamientos

# Herramientas en la planificación

- Clasificación
  - según consideren el **desarrollo temporal** del plan:
    - de cobertura (caso particular)
    - de optimización del plan:
      - estáticos
      - dinámicos
  - según **énfasis en aplicación**:
    - localización del equipo generador
    - expansión conjunta de generación y red
    - expansión estratégica de la red
    - refuerzos concretos de la red

# Herramientas en la planificación

- Clasificación
  - según **algoritmo de optimización** utilizado
    - búsqueda interactiva y/o heurística
    - optimización
      - global
      - descomposición
  - según **opciones de modelado** utilizadas

# Planificación de la red de transporte

---

1. Planteamiento del problema
2. Enfoque general metodológico
3. Modelo genérico de expansión de la red
4. Criterios de planificación
5. Enfoques alternativos
6. Herramientas en la planificación
7. Nuevos planteamientos

# Nuevos planteamientos

---

- Nuevas realidades técnicas y sociales
  - dificultad de realizar nuevas inversiones
  - mayor igualdad en los tiempos de instalación de la generación y de la red
  - potencial de utilización más alta de las instalaciones de red

# Nuevos planteamientos

---

- Nuevas realidades organizativas
  - incertidumbre en la definición y localización de nuevos grupos
  - incertidumbre en los riesgos y oportunidades asociados al ATR
  - inversión con riesgo económico
  - evaluaciones coste/beneficio por agente



# Nuevos planteamientos

---

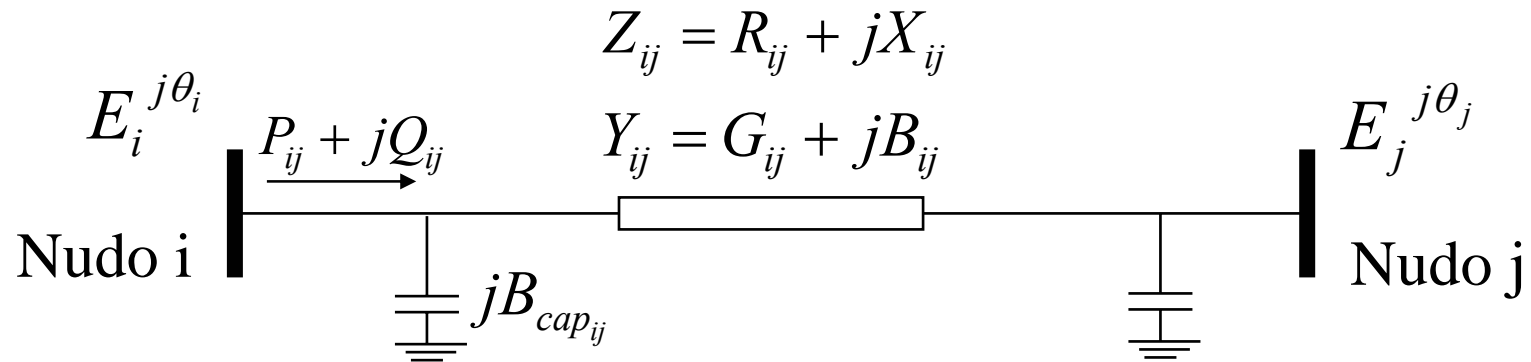
- Consecuencias
  - máxima utilización de las instalaciones existentes
  - utilización de tecnologías flexibles
  - reevaluación de los criterios de fiabilidad
  - herramientas de planificación de la expansión de la red adecuadas para el nuevo entorno más incierto

# Contenido

---

- Motivación
- Aplicaciones
- Modelos de explotación generación/red
- Planificación de la red de transporte
- **Formulación matemática**
- Algunos modelos

# Flujos en corriente alterna (modelo AC)



$$P_{ij} = G_{ij}E_i^2 - G_{ij}E_iE_j \cos(\theta_i - \theta_j) - B_{ij}E_iE_j \sin(\theta_i - \theta_j)$$

$$Q_{ij} = -B_{ij}E_i^2 + B_{ij}E_iE_j \cos(\theta_i - \theta_j) - G_{ij}E_iE_j \sin(\theta_i - \theta_j) - B_{cap_{ij}}E_i^2$$

# Flujos linealizados (modelo DC)

- Linealización de los flujos por las redes
- Aproximación correcta para los flujos de potencia activa
- Ignora las pérdidas óhmicas
- Ignora el binomio potencia reactiva - módulo de las tensiones

# Flujos linealizados (modelo DC)

- Aproximaciones

$$E_i = E_j = 1$$

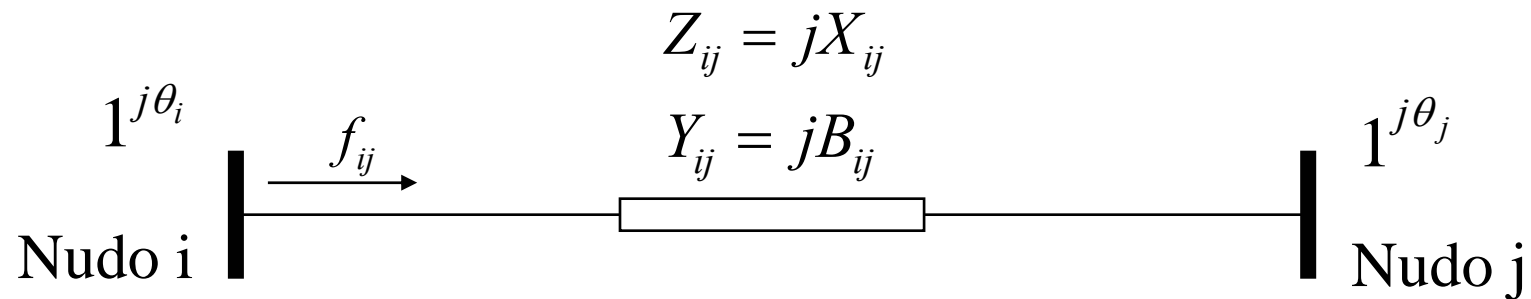
$$X_{ij} \gg R_{ij} \Rightarrow G_{ij} \approx 0$$

$$\Rightarrow B_{ij} \approx -1/X_{ij}$$

$$\cos(\theta_i - \theta_j) \cong 1$$

$$\text{sen}(\theta_i - \theta_j) \cong (\theta_i - \theta_j)$$

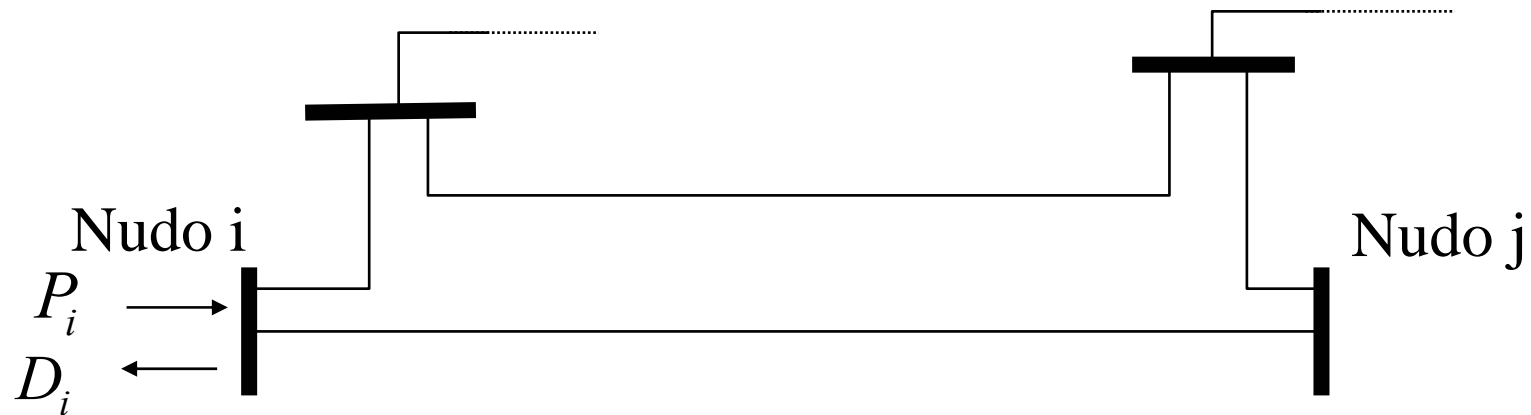
# Flujos linealizados (modelo DC)



$$f_{ij} = -B_{ij}(\theta_i - \theta_j) = \frac{1}{X_{ij}}(\theta_i - \theta_j) = \gamma_{ij}(\theta_i - \theta_j)$$

$$[f] = [T][\theta] \quad \begin{cases} T_{k,s_k} = \gamma_{s_k e_k} & \forall k \in L \\ T_{k,e_k} = -\gamma_{s_k e_k} & \forall k \in L \\ T_{k,m} = 0 & \forall k \in L, m \neq s_k, m \neq e_k \end{cases}$$

# Flujos linealizados (modelo DC)



$$J_i = P_i - D_i = \sum_{j \in \Lambda_i} f_{ij} = \sum_{j \in \Lambda_i} \gamma_{ij} (\theta_i - \theta_j)$$

$$\begin{bmatrix} J_1 \\ J_2 \\ \vdots \end{bmatrix} = [B] \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \vdots \end{bmatrix}$$

$$[J] = [B][\theta]$$

$$\begin{cases} B_{ii} = \sum_{j \in \Lambda_i} \gamma_{ij} & \forall i \in N \\ B_{ij} = -\gamma_{ij} & \forall (i, j) \in \Lambda \\ B_{ij} = 0 & \forall (i, j) \notin \Lambda, i \neq j \end{cases}$$

# Flujo de cargas (modelo DC)

- Determinar los flujos para un valor determinado de las parejas  $(P_i, D_i)$ 
  - resolver un sistema de  $N \times N$
- El sistema está indeterminado  $[J] = [B][\theta]$ 
  - determinante de la matriz B es nulo
  - los términos de la derecha son linealmente dependientes  $\sum_{i \in N} J_i = 0$
- Observar que se trabaja siempre con diferencias angulares



# Flujo de cargas (modelo DC)

- Se trabaja con un sistema reducido de  $(N-1) \times (N-1)$ 
  - nudo de referencia angular  $\theta_s = 0$
  - matriz B reducida en la columna y fila de un nudo
  - formulación:

$$[\tilde{\theta}] = [\tilde{B}]^{-1} [\tilde{J}] \quad \left| \begin{array}{l} \theta_s = 0 \\ \sum_{i \in N} J_i = 0 \quad o \quad J_s = \sum_{i \in N} B_{s,i} \theta \end{array} \right.$$

$$[f] = [\tilde{T}] [\tilde{\theta}]$$

- Papel del nudo de referencia (nudo slack)
  - requisito matemático
  - elección arbitraria

# Despacho económico (modelo DC)

- Formulación dispersa

$$\begin{aligned} & \textit{Minimizar} && C_g g + C_r r \\ & \textit{sujeto a} && -B\theta + g + r = d \\ & && f^- \leq T\theta \leq f^+ \\ & && g^- \leq g \leq g^+ \\ & && 0 \leq r \leq d \\ & && \theta_s = 0 \end{aligned}$$

# Despacho económico (modelo DC)

- Formulación densa

*Minimizar*

$$C_g g + C_r r$$

*sujeto a*

$$I_N^t g + I_N^t r = I_N^t d$$

$$f^- \leq Q(g + r - d) \leq f^+$$

$$f^- + Qd \leq Q(g + r) \leq f^+ + Qd$$

$$g^- \leq g \leq g^+$$

$$0 \leq r \leq d$$

$$I_N^t = \underbrace{[1 \quad \dots \quad 1]}_N$$

$$Q = \begin{bmatrix} \tilde{T} \tilde{B}^{-1} & \text{columna} \\ & s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}$$

# Sensibilidades (modelo DC)

- Variación del flujo por las líneas

$$f = \tilde{T}\tilde{B}^{-1}\tilde{J} = QJ$$

$$\frac{\partial f_k}{\partial J_i} = Q_{k,i}$$

- Dependencia del nudo de referencia

$$\frac{\partial f_k}{\partial J_s} = Q_{k,s} = 0$$

$$\frac{\partial f_k}{\partial J_i|_s} = Q_{k,i|_s}$$

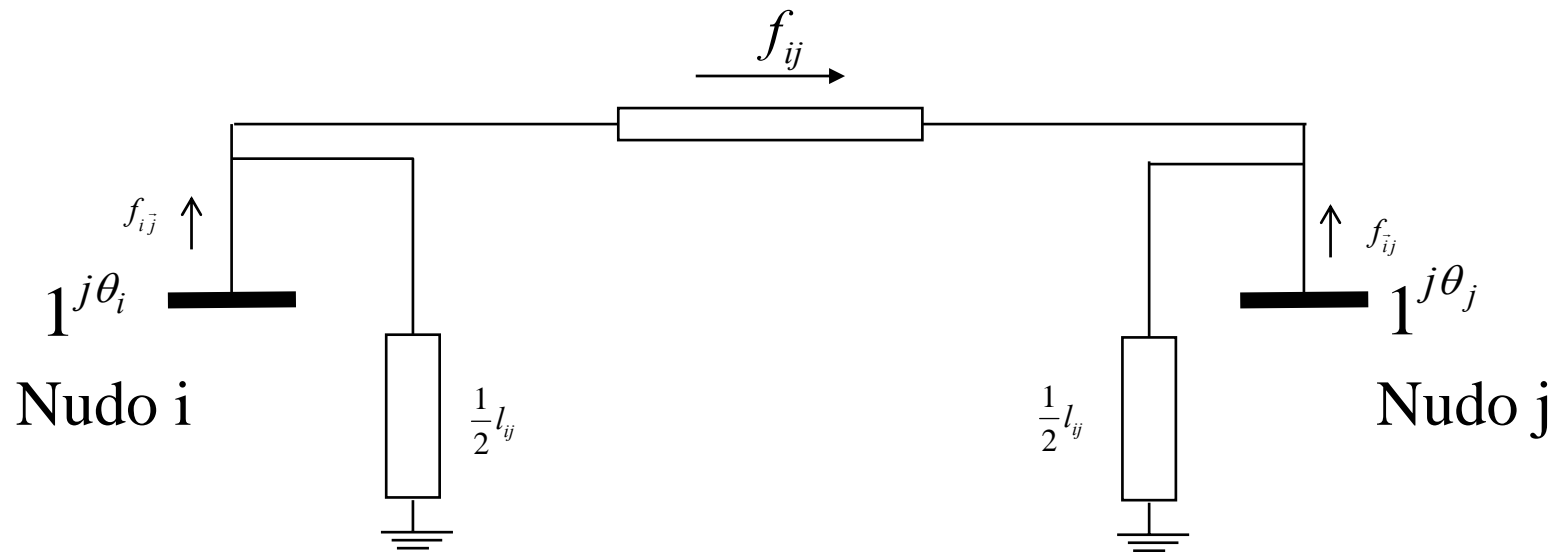
# Sensibilidades (modelo DC)

- Generalización de la variación del flujo por las líneas

$$\begin{aligned}\frac{\partial f_k}{\partial J_{i|j}} &= \frac{\partial f_k}{\partial J_{i|s}} + \frac{\partial J_j}{\partial J_s} \frac{\partial f_k}{\partial J_{j|s}} = \frac{\partial f_k}{\partial J_{i|s}} - \frac{\partial f_k}{\partial J_{j|s}} \\ &= Q_{k,i} - Q_{k,j}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial f_k}{\partial d_{i|j}} &= \frac{\partial f_k}{\partial d_{i|s}} + \frac{\partial g_j}{\partial d_s} \frac{\partial f_k}{\partial g_{j|s}} = \frac{\partial f_k}{\partial d_{i|s}} + \frac{\partial f_k}{\partial g_{j|s}} \\ &= -Q_{k,i} + Q_{k,j}\end{aligned}$$

# Pérdidas óhmicas (modelo DC)



$$l_{ij} = G_{ij} \left[ E_i^2 + E_j^2 - 2E_i E_j \cos(\theta_i - \theta_j) \right]$$

$$l_{ij} = 2G_{ij} (1 - \cos(\theta_i - \theta_j))$$

$$= G_{ij} (\theta_i - \theta_j)^2$$

# Despacho con pérdidas (modelo DC)

- Formulación

$$\begin{aligned} & \text{Minimizar} && C_g g + C_r r \\ & \text{sujeto a} && - \sum_{j \in \Lambda_i} \gamma_{ij} (\theta_i - \theta_j) + g + r = d + \sum_{j \in \Lambda_i} \frac{1}{2} l_{ij} \\ & && l_{ij} = G_{ij} (\theta_i - \theta_j)^2 \\ & && f^- \leq T\theta \leq f^+ \\ & && g^- \leq g \leq g^+ \\ & && 0 \leq r \leq d \\ & && \theta_s = 0 \end{aligned}$$

# Despacho con pérdidas (modelo DC)

- Expresión pérdidas totales

$$\begin{aligned}L &= \sum_{k \in L} l_{ij} = (S\theta)^t G(S\theta) \\ &= (\tilde{S}\tilde{\theta})^t G(\tilde{S}\tilde{\theta}) \\ &= (\tilde{S}\tilde{B}^{-1}\tilde{J})^t G(\tilde{S}\tilde{B}^{-1}\tilde{J}) \\ &= (MJ)^t G(MJ)\end{aligned}$$

$$M = \begin{bmatrix} \tilde{S}\tilde{B}^{-1} & \text{columna } s \\ & \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \end{bmatrix} \begin{cases} S_{k,s_k} = 1 & \forall k \in L \\ S_{k,e_k} = -1 & \forall k \in L \\ S_{k,m} = 0 & \forall k \in L, m \neq s_k, m \neq e_k \end{cases}$$



# Sensibilidades (modelo DC con pérdidas)

- Variación de las pérdidas totales

$$\frac{\partial L}{\partial J_i} = 2 \left[ M_{*,i} \right]^t G M J$$

- Dependencia del nudo de referencia

$$\frac{\partial L}{\partial J_s} = 2 \left[ M_{*,s} \right]^t G M J = 0$$

$$\frac{\partial L}{\partial J_{i|s}} = 2 \left[ M_{*,i|s} \right]^t G M_{|s} J$$

# Sensibilidades (modelo DC con pérdidas)

- Factores de pérdidas

$$-\frac{\partial J_j}{\partial J_i} = \left(1 - \frac{\partial L}{\partial J_i|_j}\right)$$

- Generalización de su cálculo

$$\frac{\partial J_j}{\partial J_i} = \frac{\partial J_j}{\partial J_s} \frac{\partial J_s}{\partial J_i}$$

$$\left(1 - \frac{\partial L}{\partial J_i|_j}\right) = \left(1 - \frac{\partial L}{\partial J_i|_s}\right) \left(1 - \frac{\partial L}{\partial J_s|_j}\right)$$

$$= \frac{\left(1 - 2[M_{*,i}]^t G M J\right)}{\left(1 - 2[M_{*,j}]^t G M J\right)}$$

# Sensibilidades (modelo DC con pérdidas)

- Variación de los flujos

$$\begin{aligned}\frac{\partial f_k}{\partial J_i|_j} &= \frac{\partial f_k}{\partial J_i|_s} + \frac{\partial J_j}{\partial J_s} \frac{\partial f_k}{\partial J_j|_s} \\ &= \frac{\partial f_k}{\partial J_i|_s} - \left(1 - \frac{\partial L}{\partial J_i|_s}\right) \frac{\partial f_k}{\partial J_j|_s} \\ &= Q_{k,i} - \left(1 - 2[M_{*,i}]^t G M J\right) Q_{k,j}\end{aligned}$$

# Resumen comportamiento sensibilidades

- Flujos respecto a inyecciones
  - términos se suman para obviar el nudo de referencia
- Factores de penalización de pérdidas
  - términos se multiplican para obviar el nudo de referencia

# Contenido

---

- Motivación
  - Aplicaciones
  - Modelos de explotación generación/red
  - Planificación de la red de transporte
  - Formulación matemática
- 
- Algunos modelos

# Algunos modelos

---

- Aplicación de **corto plazo**
  - PSS/E
- Aplicación de **medio plazo**
  - StarNet
- Aplicación de **largo plazo**
  - PERLA / CHOPIN