

**MODELOS DE EXPLOTACION A MEDIO PLAZO
DE LA GENERACION ELÉCTRICA
APLICACIONES PARA EL SISTEMA ESPAÑOL**

Andrés RAMOS GALAN

Ingeniero Industrial por la Universidad Pontificia Comillas

presentada en la
E.T.S. DE INGENIEROS INDUSTRIALES
de la
UNIVERSIDAD POLITECNICA DE MADRID

Énfasis tanto en desarrollo de modelos propios como en análisis metodológico detallado de modelos existentes.

OBJETIVO

∃

- **Múltiples modelos aplicables** al sist esp.
- **Análisis crítico de los modelos de explotación en función de:**
 - **sistema eléctrico** *características intrínsecas del sistema*
 - **aplicación es posibles** *aplicación es posibles*
- **Desarrollo de un modelo de referencia** *que permita establecer*
- **Comparaciones metodológicas cualitativas y cuantitativas entre modelos**
- **Detección de errores importantes**
- **Proponer un modelo patrón** *con estructura jerárquica de las decisiones.*

- 1. PLANIFICACION DE LA EXPLOTACION DE LA GENERACION A MEDIO PLAZO.**
- 2. MODELOS DE EXPLOTACION A MEDIO PLAZO DE LA GENERACION.**
- 3. COMPARACION ENTRE MODELOS.**
- 4. MODELOS DE OPTIMIZACION DETERMINISTA.**
- 5. MODELOS DE SIMULACION PROBABILISTA.**
- 6. MODELO DE OPTIMIZACION PROBABILISTA.**
- 7. VALORACION DE MODELOS.**
- 8. CONCLUSIONES.**

- 1) Enmarcar planif. explot. de la generación a medio plazo dentro de ^{alcance temporales} funciones de ^{Vde} cía electr. ~~verticalmente condicionada~~
 - 2) ~~(1, 2)~~ Centrar más que tipo de modelos de explotación se han estudiado. } generación/red
tratam. hidr.
 - 3) Qué es un modelo de explotación, en qué consiste. Utilizaciones posibles. Para establecer las comparaciones entre modelos se realiza una clasificación de los modelos atributos básicos y definen Elementos ^{significativos} de comparación entre ellos
 - 4) Breve descripción metodológica de ciertos modelos manejados en la tesis
 - 5) Valoración ^{cuantitativa} de los modelos analizados de ciertas características relevantes. y donde los errores detectados son relevantes
 - 6) Especificación de modelo patrón
- Líneas de continuación
 Resumen de Aportaciones



planif y explot.

* Funciones relacionadas con el control, optimización y despacho de la generación.

* Traducir en conjunto Herramientas jerarquizadas (decisiones ↓)
Representación adecuada de las variables de decisión relevantes
Modelado
Representación del funcionamiento real del sist. eléctricos.



ALCANCE	FUNCIONES
MUY LARGO PLAZO 10 a 25 años	<ul style="list-style-type: none"> • decisión de expansión del equipo generador • nueva instalación de centrales o retirada de existentes
LARGO PLAZO 2 a 5 años	<ul style="list-style-type: none"> • gestión del ciclo de combustible nuclear • política de utilización de embalses hiperanuales
MEDIO PLAZO 1 a 2 años	<ul style="list-style-type: none"> • programación de los ciclos de mantenimiento • gestión de embalses anuales • análisis de cobertura de la demanda • previsiones de consumos de combustibles y costes de explotación
CORTO PLAZO 1 a 4 semanas	<ul style="list-style-type: none"> • funcionamiento de los grupos de bombeo • programación de las paradas en fin de semana de grupos térmicos
MUY CORTO PLAZO < 1 semana	<ul style="list-style-type: none"> • programación semanal y horaria de la generación térmica, hidráulica y de bombeo • decisión sobre arranques y paradas de grupos
TIEMPO REAL < 1 hora	<ul style="list-style-type: none"> • despacho económico de los grupos acoplados a red • control frecuencia/potencia de las áreas de generación • intercambios entre áreas

CONDICIONANTES

- **Descomposición natural en función de las decisiones a tomar y de los departamentos involucrados.**
- **Representación adecuada de las principales variables que afectan a cada nivel de decisión.**
- **Decisiones de modelos superiores comprometen a modelos inferiores.**
- **Deben reproducir las condiciones reales de funcionamiento de los modelos inferiores.**
- **Distribución equilibrada de la complejidad del cálculo.**

Atendiendo al tratamiento de la red

* Nudo único \equiv nivel jerárquico I

* Multiárea ~~linas de interconexión~~ líneas de interconexión como apoyo al despacho de sistemas aislados

* Red modelada en detalle (nudos y líneas)
Flujo de cargas ^{óptimos} ~~reducidos~~ ^{multiplicados} (transporte, DC) OPF



GENERACION

**Modelos de explotación
DE NUDO
UNICO**

**Modelos de explotación
MULTIAREA**

RED

**Modelos de explotación
GENERACION
/RED**



CARACTERISTICAS DE RED EN MODELOS DE NUDO UNICO

PÉRDIDAS DE TRANSPORTE

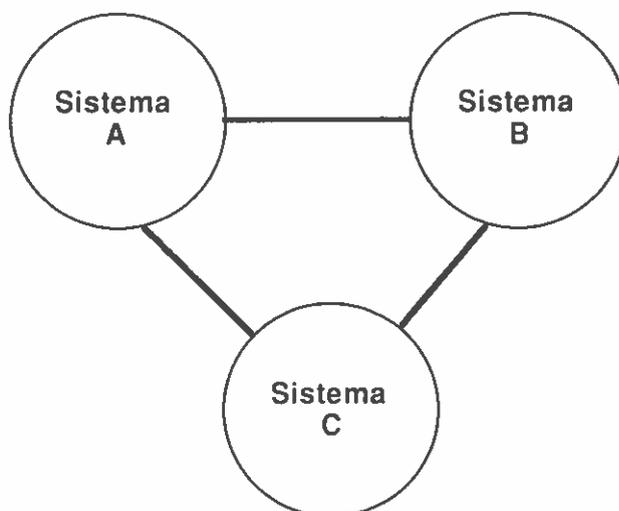
- **Coeficientes de penalización**

LIMITACIONES IMPUESTAS POR LA RED

- **Modificadores del despacho**
- **Limitación de energía**
- **Grupo obligatorio**

DESPACHO MULTIAREA

- **Despacho independiente en cada área incluyendo posibilidad de compra o venta a través de la línea.**
- **Valoración económica que supone una línea de interconexión.**
- **Usos:**
 - Intercambios entre naciones**
 - Transferencia entre regiones**
 - Localización de la generación**
 - Moratoria en la construcción de centrales**



Tratamiento hidr.

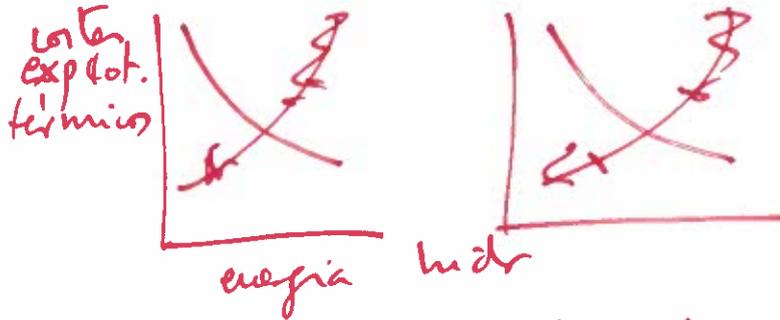
* Diseño preferentemente térmico

* Hidrotérmico | modelado térmico e hidros
equivalente

Con conocimiento del comportamiento (curvas de coste) del equipo térmico deducir la prod. hidráulica

* Hidráulico (nit. eminentemente hidráulicos)
detalle de produe. ~~de los grupos~~ para conseguir la ^{mejor} producción
~~de~~ semanales prefijados

Optimizar ~~la~~ ~~energía~~ energía hidr en diferentes periodos para minimizar costes de explot térmicos.



Restricciones propias de gestión hidráulica
limitaciones embalses, etc.
aportaciones
Múltiples cuencas/subcuencas

Horizonte multiannual

¿Estocasticidad?

Prog dinámica estocástica
Flujos en redes
Prog lineal - no lineal



**Modelo de
explotación
PREFERENTEMENTE
TERMICO**

**Modelo de
explotación
COORDINACION
HIDROTERMICA**

**Modelo de
explotación
HIDRAULICO**

MODELO DE EXPLOTACION HIDRAULICO

OBTIENE LA DISTRIBUCION DE PRODUCCION HIDRAULICA PARA CADA PERIODO (POLITICA DE GESTION HIDRAULICA)

CONSIDERACIONES:

- **Horizonte temporal multianual**
- **Estocasticidad en aportaciones**

FUNCION OBJETIVO:

- **Minimización de costes térmicos e indisponibilidad**
- **Maximización de costes de sustitución hidráulicos (precios sombra)**
- **Minimización de riesgos de vertidos, evaporación**
- **Maximización de rendimientos**

RESTRICCIONES:

- **Espaciales (dependencias entre grupos de la misma cuenca hidrográfica)**
- **Temporales (acoplamientos entre períodos)**
- **Balances dinámicos para cada embalse**
- **Límites de funcionamiento**

TÉCNICAS MATEMATICAS:

- **Programación dinámica estocástica**
- **Flujos en redes (no lineales, multiartículo)**
- **Programación lineal**

- 1. PLANIFICACION DE LA EXPLOTACION DE LA GENERACION A MEDIO PLAZO.**
- 2. MODELOS DE EXPLOTACION A MEDIO PLAZO DE LA GENERACION.**
- 3. COMPARACION ENTRE MODELOS.**
- 4. MODELOS DE OPTIMIZACION DETERMINISTA.**
- 5. MODELOS DE SIMULACION PROBABILISTA.**
- 6. MODELO DE OPTIMIZACION PROBABILISTA.**
- 7. VALORACION DE MODELOS.**
- 8. CONCLUSIONES.**

* Abrir ventana en el horizonte futuro

Evaluar la explotación para min. catas

* Recursos técnicos e hidr.

* Diferentes perspectivas y objetivos, incluso para
un mismo sist. electr. \rightarrow aplicaciones
en función de las

~~Elaboración de la Agenda 2030~~



OBJETIVOS:

- **Funcionamiento futuro del sistema.**
- **Programar la explotación al mínimo coste, sin comprometer la fiabilidad del sistema.**
- **Coordinar el uso de recursos.**

HERRAMIENTAS DE ANALISIS:

- **Complejas y diversas.**
- **En continuo perfeccionamiento.**
- **Técnicas matemáticas variadas (programación lineal, no lineal, estocástica, programación combinatoria, lineal estocástica, dinámica estocástica, etc).**
- **Diferentes perspectivas y objetivos.**

Demanda monótona para cada período

Grupos

Prom

Min tec.

Consumo específico

Prob fallo

Combust

Costes

Emissiones

Estrategias despacho (min tec., decisiones de acoplamiento, reserva rodante)

Prioridades (locales - foráneas)

exógenas a la planificación de la generación equilibrio más problemas red

Medidas de fiabilidad o calidad de servicio

Demanda	Características grupos	Características combustibles	Estrategias despacho	Prioridades exógenas
----------------	-----------------------------------	---	---------------------------------	---------------------------------

MODELO DE EXPLOTACION DE LA GENERACION

Producciones grupos	Coste total	Consumo combustible	Medidas fiabilidad
--------------------------------	------------------------	--------------------------------	-------------------------------

Expansión equipo generador
decisión sobre grupos a incluir y
en qué fases

Carbón
Nuclear

Certificación carga / tarifas
interoperabilidad

Nuevas tecnologías / solar
eólica
minicentrales automatizadas

- No todos los modelos sirven para todas estas

utilizaciones

- Muchas veces
Han influido en el diseño (bueno para unas
inadecuado
para otras)

UTILIZACIONES POSIBLES

Modelo explotación

Expansión equipo generador

Políticas de gestión de carga

Nuevas tecnologías

Compras de combustible

Programación mantenimiento

Cobertura de la demanda

Coordinación hidrotérmica

Gestión del bombeo

OBJETIVO BASICO DE LA TESIS

1. PLANIFICACION DE LA EXPLOTACION DE LA GENERACION A MEDIO PLAZO.
2. MODELOS DE EXPLOTACION A MEDIO PLAZO DE LA GENERACION.
3. COMPARACION ENTRE MODELOS. *METODOLOGICA Y BASICA (NO en su ~~aplicación~~ comparación con sist. real)*
4. MODELOS DE OPTIMIZACION DETERMINISTA.
5. MODELOS DE SIMULACION PROBABILISTA.
6. MODELO DE OPTIMIZACION PROBABILISTA.
7. VALORACION DE MODELOS.
8. CONCLUSIONES.

*PRESENTAR ATRIBUTOS BASICOS
CARACTERISTICAS SIMPLICATIVAS*

Períodos: (Permite jerarquización de decisiones)

hipótesis Una semana como periodo

Acoplamiento o no de grupos en una semana

Energía hidr. a producir en la semana

~~Restricción de un grupo~~

Restricción o no de un grupo

INTRA - competir a un periodo

INTER - relacionan (acoplam) muchos

aleatoriedades del sistema eléctrico
por este alcance temporal

MODELADO DE LA EXPLOTACION

PERIODO:

- Intervalo natural de tiempo homogéneo en condiciones exógenas a decisiones de explotación (situación de los grupos, producible hidráulico).

DECISIONES INTRAPERIODO:

- acoplamiento y orden de despacho de grupos térmicos
- gestión de energía grupos hidráulicos y de almacenamiento

DECISIONES INTERPERIODO:

- gestión del producible hidráulico y del bombeo estacional
- programación de la revisiones
- gestión de combustibles

ALEATORIEDADES:

- demanda
- generación
- aportaciones hidráulicas

RESTRICCIONES Y ESTRATEGIAS DE DESPACHO QUE HAGAN ÉSTA REALISTA.

* Optimización: min F.O. [Costes de explotac.]

Variables de decisión

[acoplamiento, gestión hídrica, revisiones]

Restricciones

* Simulac. Variables de decisión conocidas fijadas con anterioridad
Separación no tan clara \exists mod de SP que (bto optim en simul)

* Prob considera explícitamente situaciones aleatorias
métodos analíticos, ^{enumeración} ~~ortogonal~~ H.C.

* Det valores esperados medios
metodológicamente se ignora aleatoriedad

* Tradeoff periodos no conectados no \exists variables
acoplamiento

Sin con memo Sin cronológica

Optim. Variables que acoplan periodos | gestión hídrica, revisiones

Conflictos

optimiz - prob (mod referencia)
prob - optim multiperiodo (mod petron)

Alternativamente
Optimiz
Simulac.

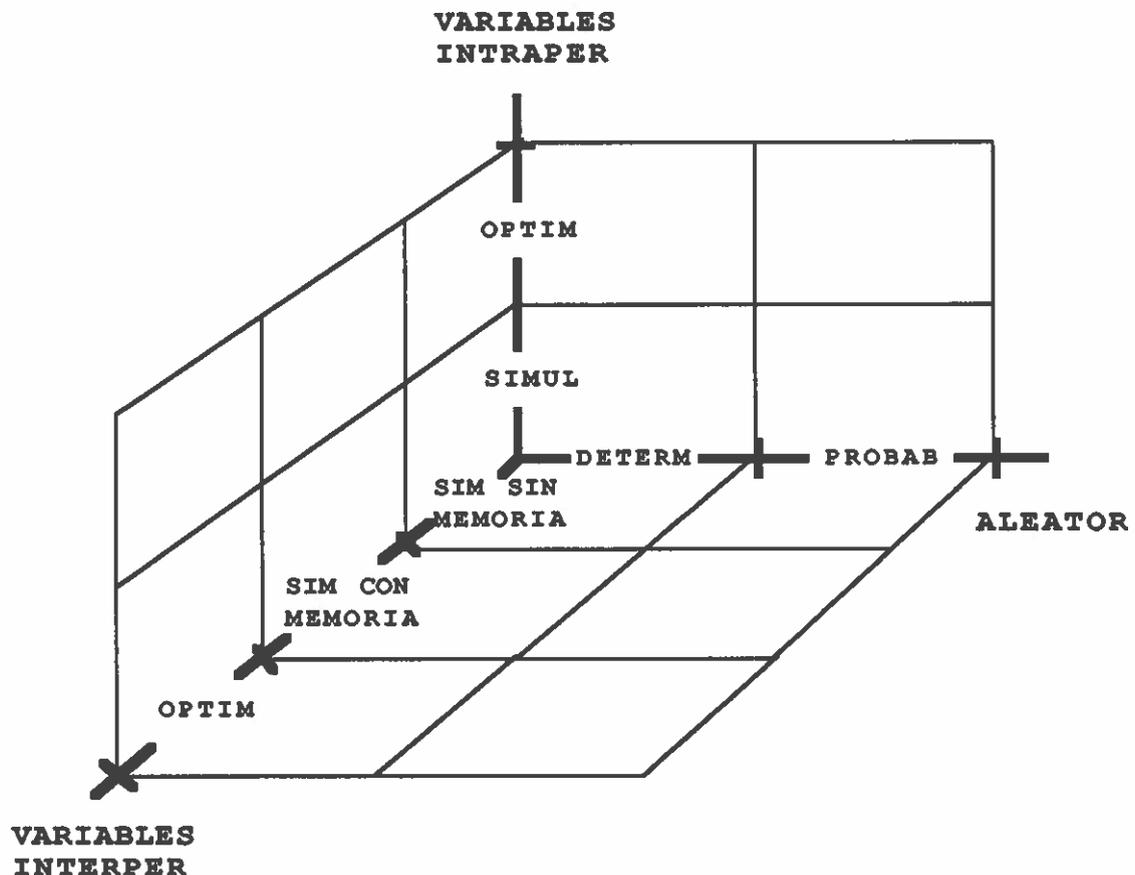
— modelos globales políticas aproximadas
refinar resultados

TAXONOMIA DE MODELOS

A) $\left\{ \begin{array}{l} \text{Optimización} \\ \text{Simulación} \end{array} \right\}$ de variables de decisión intraperíodo.

B) Tratamiento de las aleatoriedades $\left\{ \begin{array}{l} \text{probabilista} \\ \text{determinista} \end{array} \right\}$.

C) $\left\{ \begin{array}{l} \text{Optimización} \\ \text{Sim. con memoria} \\ \text{Sim. sin memoria} \end{array} \right\}$ variables decisión interperíodo.



Desarrollado en 83-87

Modex:

se utilizó en años 83-85 para elaborar PEN

20 líneas
5 M CPU
15 M CPU
DMA
A

actualmente usado en ENDESA, REE ^{conjuntamente}

ELEAS:

origen MIT principios 80 | caso español, sist. CA. (muy lento)

70 líneas
CPU

conexión con MOPEX
modif ^{para mejorar el modelo} sist español ^{que vive con muchos cambios}

PROSITO:

origen MIT

8 líneas
CPU

gran modificación IIT | algoritmos de despacho
usado en evaluac central sobrec y colinas 83-84
criterio de orden de carga

actualmente REE valoración reservas remanentes

MCEA

desarrollado en ate tesis

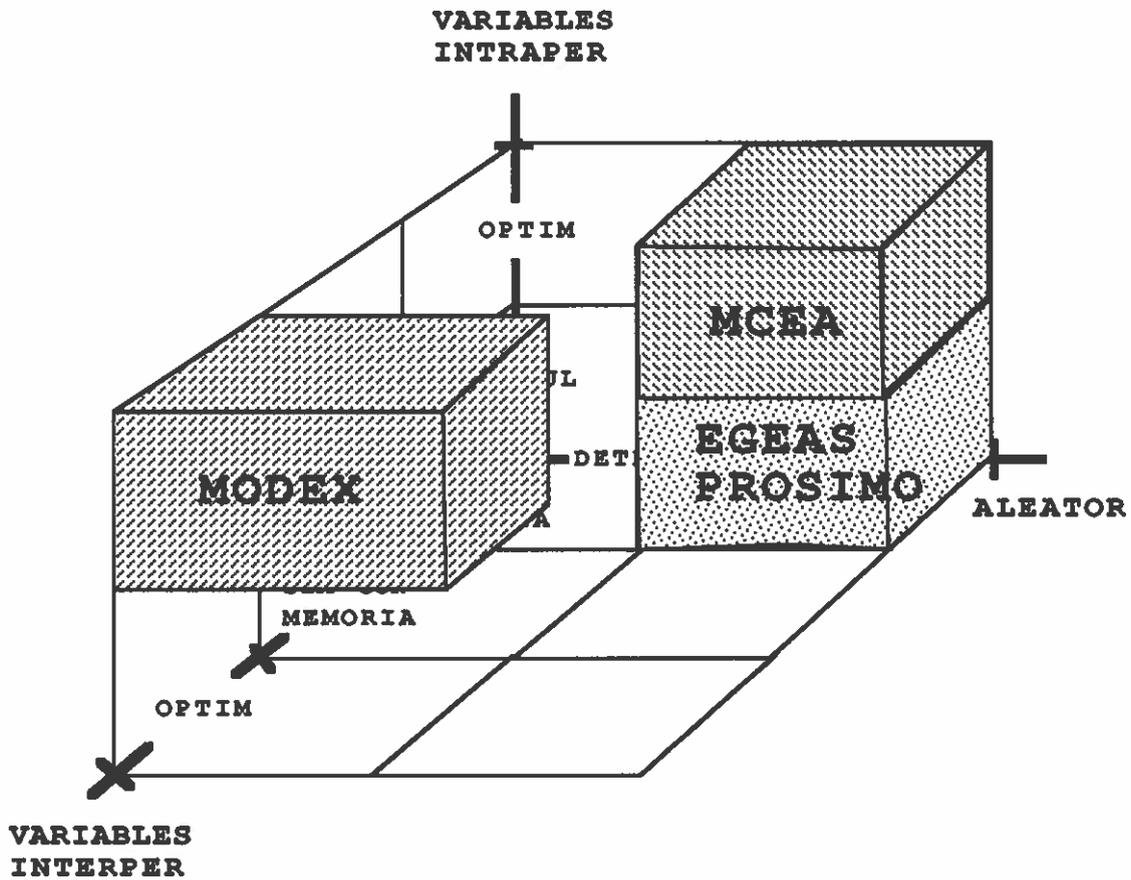
15 líneas

causas principales

Nacer en que

Esta tesis recoge tanto ^{nuevos modelos realizados durante la tesis} ~~aportaciones~~ ~~hechos~~ ~~lujan~~ ~~paragras~~ como el conocimiento adquirido en el desarrollo de otros mod de expl. aplicados al sist español.

ELECCION DE MODELOS



CAUSAS

- modelos utilizados en sistema español
- conocidos en detalle por haber participado en su mejora y/o desarrollo

SIGNIFICATIVOS

ELEMENTOS DE COMPARACION

I) ORDEN DE CARGA

*Cómo se elabora
qui' considera*

II) PARQUE TÉRMICO

- Nivel de agregación
- Tratamiento de la aleatoriedad

III) PARQUE HIDROELÉCTRICO

- Nivel de agregación
- Gestión estacional
- Tratamiento de la aleatoriedad en aportaciones

IV) EQUIPO DE BOMBEO

- Ciclo semanal
- Ciclo estacional

V) MEDIDAS DE FIABILIDAD

*aunque no es el propósito
especifico de estos modelos*

VI) REPRESENTACION DE LA MONOTONA DE DEMANDA

VII) PROGRAMACION DEL MANTENIMIENTO

- Criterio económico
- Criterio de fiabilidad

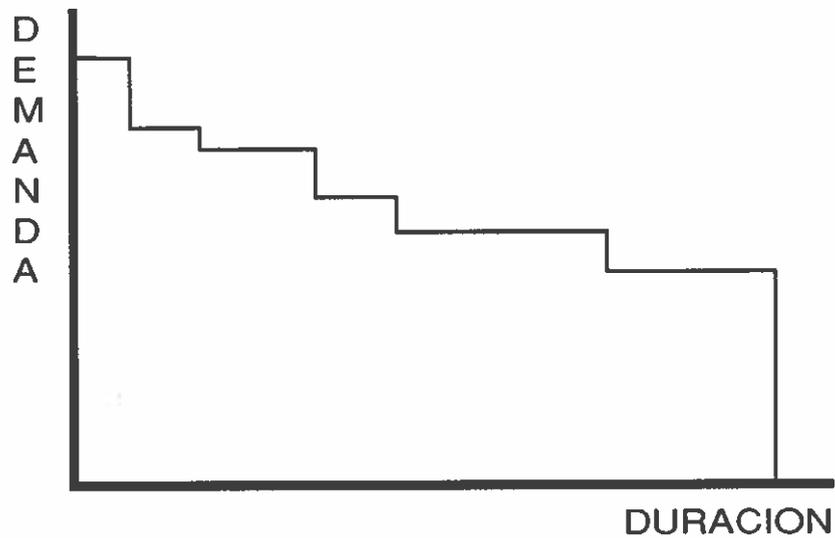
VIII) ANALISIS DE SENSIBILIDAD

IX) REQUISITO DE TIEMPO DE CALCULO

- 1. PLANIFICACION DE LA EXPLOTACION DE LA GENERACION A MEDIO PLAZO.**
- 2. MODELOS DE EXPLOTACION A MEDIO PLAZO DE LA GENERACION.**
- 3. COMPARACION ENTRE MODELOS.**
- 4. MODELOS DE OPTIMIZACION DETERMINISTA.**
- 5. MODELOS DE SIMULACION PROBABILISTA.**
- 6. MODELO DE OPTIMIZACION PROBABILISTA.**
- 7. VALORACION DE MODELOS.**
- 8. CONCLUSIONES.**

DEMANDA

- **Monótona de carga linelizada en escalones**



GENERACION TERMICA

- **Potencia reducida por su disponibilidad.**

GENERACION HIDRAULICA

- **Potencia fluyente y potencia de regulación.**
- **Energía anual máxima disponible.**

GENERACION DE BOMBEO

- **Potencia de bombeo y de generación.**
- **Ciclo semanal y estacional.**

1) Horóntone linealizada \rightarrow prog lineal
 no linealizada \rightarrow no lineal
 Períodos: (pta laborable, llano L, VL, PF, LF, VF)
 en cada mes (72 períodos)
 Trat determinista de gen técnica

2) Despacho:

Min tec. 1ª Reserva rodante
~~Restricción~~ prioridades exógenas limitaciones o contingentes de consumo de combustibles
 GRAN PROBLEMA DE PROG LINEAL $\left\{ \begin{array}{l} OA \\ OM \end{array} \right.$

Variables en cada período

Restricciones que lo hacen realista

pot ~~pot~~ acoplada labor > pot acoplada futuro
 producida pta > llano

pot turbinada \leq pot disponible ~~llano para~~ la

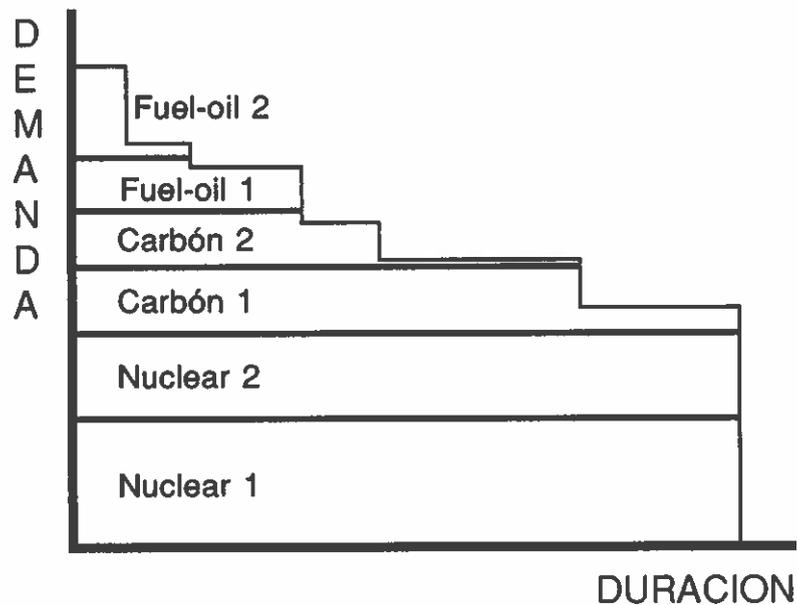
energía turbinada en semana = energía llano

reserva hidr máx y mín
 Restricciones intra inter

3) Optimiz interp.

- Gestión hidr
- Bbo estacional
- Gestión combustibles

DESPACHO DE LOS GRUPOS



VARIABLES DE PROBLEMA

- **Potencia acoplada de cada equipo térmico.**
- **Potencia utilizada y energía producida del equipo hidráulico.**
- **Potencia de bombeo.**

FUNCION OBJETIVO

- **FUNCION OBJETIVO LINEAL** suma para cada equipo de coste de combustible + coste de acoplamiento + coste de parada en fin de semana

más penalizaciones por defecto y exceso de potencia y defecto de reserva rodante

RESTRICCIONES

RESTRICCIONES DEL PARQUE TÉRMICO

Para cada período en que se divide el año y para cada equipo

- potencia acoplada en laborable \leq potencia disponible
- potencia acoplada en laborable \geq potencia acoplada en festivo
- potencia acoplada en laborable \geq potencia producida en punta laborable
- potencia acoplada en festivo \geq potencia producida en punta festivo

para laborable y festivo

- potencia producida en cada escalón \geq potencia producida en escalón inferior

RESTRICCIONES DEL EQUIPO HIDROELÉCTRICO CONVENCIONAL

Asociadas a la potencia máxima hidráulica en cada período en función de las reservas y potencia disponible hidráulica.

Restricciones de potencia hidroeléctrica producida:

- potencia hidráulica máxima - potencia producida en punta - potencia turbinada en punta por el equipo de bombeo estacional ≥ 0
- potencia hidráulica producida en punta \geq potencia hidráulica producida en llano
- potencia hidráulica producida en llano \geq potencia hidráulica producida en valle
- potencia hidráulica producida en valle \geq potencia hidráulica mínima

Restricción de energía producible en todos los períodos mayor que la energía producida en todos los bloques.

RESTRICCIONES DEL EQUIPO DE BOMBEO ESTACIONAL

- potencia bombeada \leq potencia disponible para bombeo estacional
- energía almacenada mediante el bombeo estacional + energía bombeada * rendimiento del ciclo bombeo/turbinación - energía turbinada ≥ 0

RESTRICCIONES DE RESERVAS HIDRAULICAS

- **reserva en el período - reserva en el período anterior - energía almacenada por el bombeo estacional + energía hidráulica producida en el período \leq aportaciones del período.**
- **reserva en el período \leq reserva máxima**
- **reserva en el período \geq reserva mínima**

RESTRICCIONES DEL EQUIPO DE BOMBEO PURO

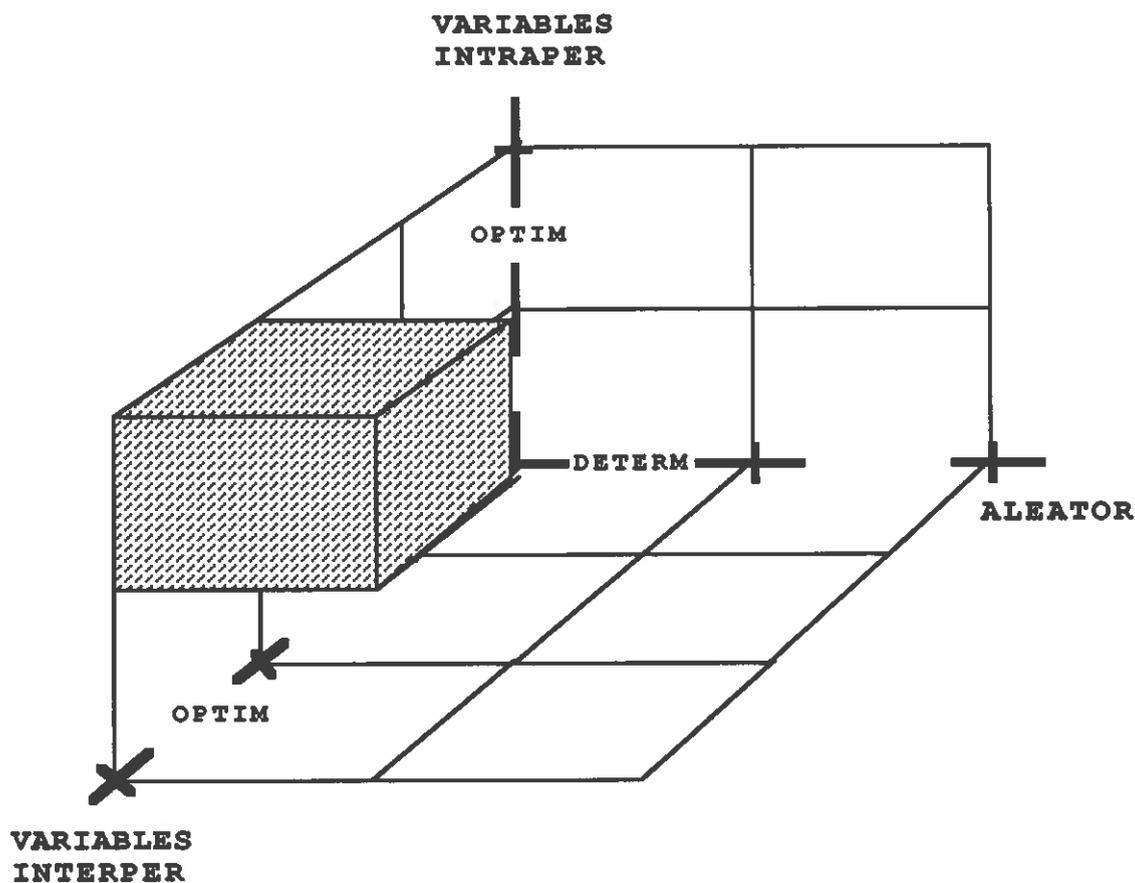
- **potencia bombeada \leq potencia disponible de bombeo**
- **potencia turbinada \leq potencia disponible de bombeo**
- **energía almacenada por bombeo puro en fin de semana * rendimiento del ciclo bombeo/turbinación - energía turbinada en punta \leq energía almacenable en el vaso superior**
- **energía almacenada por bombeo durante la semana * rendimiento del ciclo bombeo/turbinación - energía turbinada en la semana = 0**

RESTRICCION DE DEFECTO DE RESERVA RODANTE

- **potencia acoplada de los equipos térmicos + potencia extrema hidráulica - potencia producida por los equipos térmicos en punta - potencia producida por el equipo hidráulico en punta - potencia turbinada por el equipo de bombeo estacional en punta - reserva rodante en punta = 0**
- **reserva rodante + defecto de reserva rodante \geq valor consigna de reserva rodante**

RESTRICCIONES DE DEFECTO Y EXCESO DE POTENCIA

- **potencia producida por todos los equipos térmicos - potencia producida para bombeo puro y estacional + defecto de potencia - exceso de potencia = potencia demandada por el mercado**
- **exceso en valle \leq exceso máximo admisible en valle**



OPTIMIZACION INTRAPERIODO.

- Potencias acopladas de cada equipo
- Restricciones que afectan al orden de carga (mínimos técnicos, reserva rodante)

TRATAMIENTO DETERMINISTA DE ALEATORIEDADES.

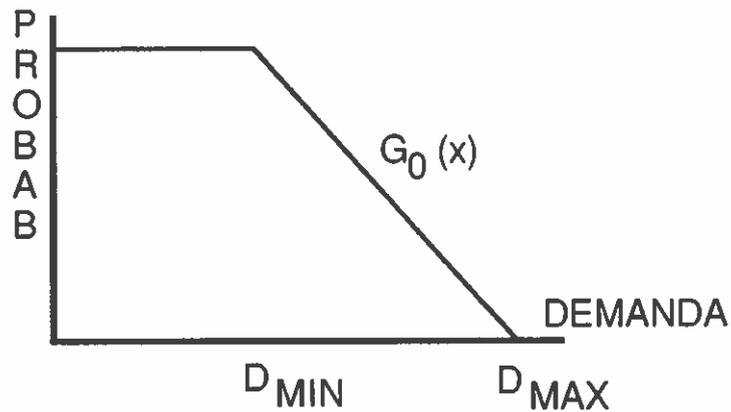
- Demanda, generación, producible hidráulico

OPTIMIZACION INTERPERIODO.

- 1. PLANIFICACION DE LA EXPLOTACION DE LA GENERACION A MEDIO PLAZO.**
- 2. MODELOS DE EXPLOTACION A MEDIO PLAZO DE LA GENERACION.**
- 3. COMPARACION ENTRE MODELOS.**
- 4. MODELOS DE OPTIMIZACION DETERMINISTA.**
- 5. MODELOS DE SIMULACION PROBABILISTA.**
- 6. MODELO DE OPTIMIZACION PROBABILISTA.**
- 7. VALORACION DE MODELOS.**
- 8. CONCLUSIONES.**

DEMANDA

- Variable aleatoria modelada mediante curva duración-carga (curva complementaria de la función de distribución)



GENERACION

Variable aleatoria binomial.

$$P_{i,d} = \begin{cases} P_{i,n} & \text{con probabilidad } p_i \\ 0 & \text{con probabilidad } q_i \end{cases}$$

$$p_i + q_i = 1$$

$P_{i,d}$ potencia disponible del grupo i.

$P_{i,n}$ potencia nominal del grupo i.

p_i probabilidad de que el grupo i esté totalmente disponible.

q_i probabilidad de estar fallado el grupo i.

Prob $d_{min} \leq$ ~~valor~~ curva
Dm Dm

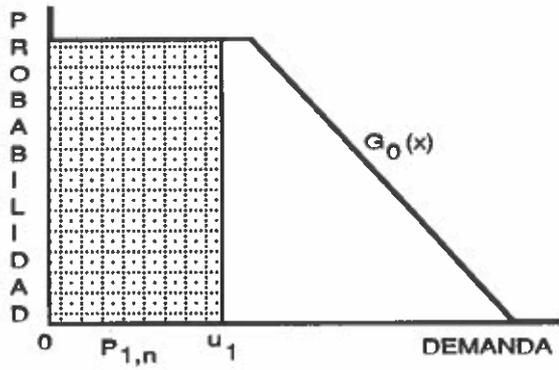
① Binomial — multinomial
Varios bloques / fallo
coste variable

② LDC equivalente
Cálculo de energía producida
Despacho de 2^a incluye todas las estados / fallo
1^a central
2^a central
de la 1^a

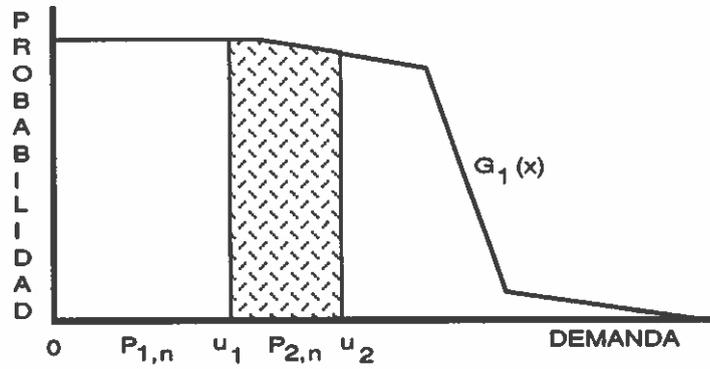
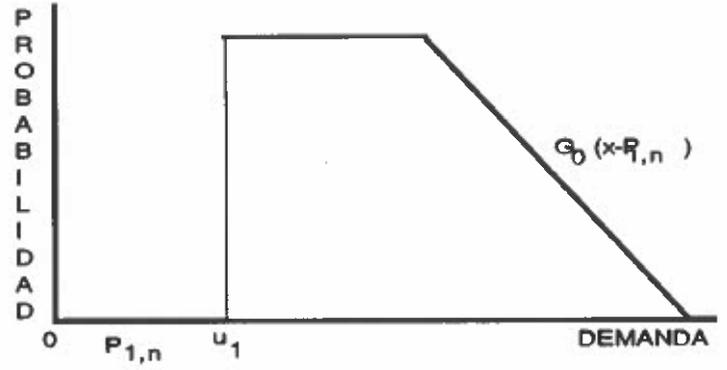
③ Restricciones a través de criterios

CONVOLUCION

con probabilidad p_i



con probabilidad q_i



DESPACHO DE LOS GRUPOS

$$DE = DC + DF$$

DE demanda equivalente.

DC demanda del consumo.

DF demanda asociada a fallos de los grupos ya despachados.

$$DE_{i+1} = DC + \sum_{l=1}^i DF_l$$

DE_{i+1} demanda equivalente para el grupo $i+1$.

DF_l demanda debida a la indisponibilidad del grupo l .

$$DE_{i+1} = DE_i + DF_i$$

$$G_{i+1}(x) = p_i G_i(x) + q_i G_i(x - P_{i,n})$$

$G_0(x)$ curva duración-carga inicial para la demanda del consumo.

$G_i(x)$ curva duración-carga equivalente para la unidad i .

x valor de la abcisa (potencia) de la curva duración-carga.

$$E_i = T p_i \int_{u_{i-1}}^{u_i} G_i(x) dx = T \left[\int_{u_{i-1}}^{\infty} G_i(x) dx - \int_{u_i}^{\infty} G_{i+1}(x) dx \right]$$

$$u_0 = 0$$

$$u_i = u_{i-1} + P_{i,n}$$

E_i energía esperada producida por la unidad i .

T período de tiempo.

u_{i-1} punto de carga para la unidad i .

MEDIDAS DE FIABILIDAD

PROBABILIDAD DE PÉRDIDA DE CARGA

$$\text{LOLP} = G_{N+1}(u_N)$$

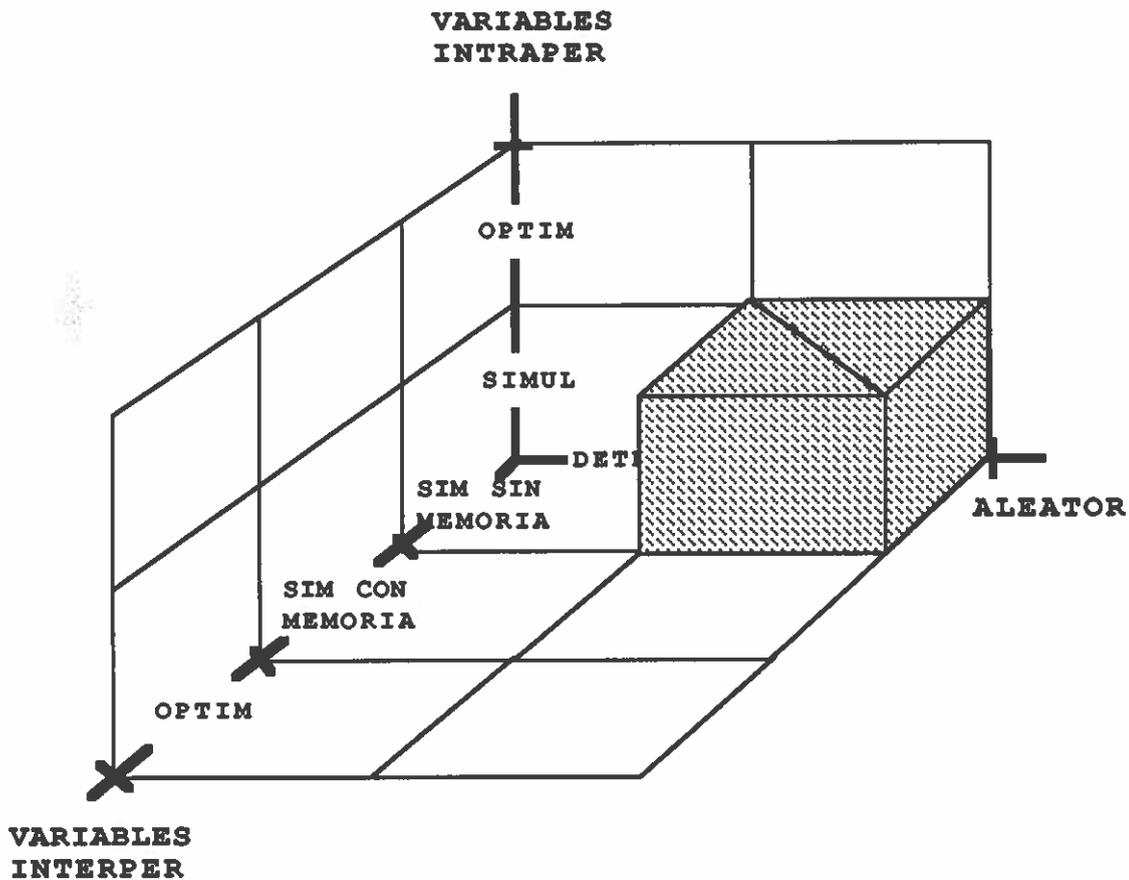
N número total de grupos del sistema.

G_{N+1} curva duración-carga equivalente después de convolucionar la última unidad **N** del sistema.

u_N potencia total instalada en el sistema.

ENERGIA NO SUMINISTRADA ESPERADA

$$\text{EENS} = \int_{u_N}^{\infty} G_{N+1}(x) dx$$



SIMULACION INTRAPERIODO.

- Orden de carga (criterios heurísticos)
- Restricciones que afectan al orden de carga (mínimos técnicos, reserva rodante)

TRATAMIENTO PROBABILISTA DE ALEATORIEDADES.

- Demanda, generación

INDEPENDENCIA ENTRE PERIODOS.

1. PLANIFICACION DE LA EXPLOTACION DE LA GENERACION A MEDIO PLAZO.
2. MODELOS DE EXPLOTACION A MEDIO PLAZO DE LA GENERACION.
3. COMPARACION ENTRE MODELOS.
4. MODELOS DE OPTIMIZACION DETERMINISTA.
5. MODELOS DE SIMULACION PROBABILISTA.
6. MODELO DE OPTIMIZACION PROBABILISTA.
7. VALORACION DE MODELOS.
8. CONCLUSIONES.

1500 lines

* Combina características de ambos modelos OD y SP

* Incluye características relevantes para establecer comparaciones

incertidumbre en generación

optimización orden de carga

estocasticidad en ~~carga a las~~ oportunos

* Optimiza la explot.

fallo aleatorio

restricciones a la explot debidas a min. tec.

no linealidad de demanda

bloques de potencia de los grupos y sus distintos

costes variables

* Mezcla cuasi estática - es conveniente explotar su estructura

Este modelo pueda ser convertido en los otros con ciertas simplificaciones.

FUNCION OBJETIVO: minimización de costes de explotación

no lineales: costes variables de producciones de los grupos

coste de la energía no suministrada

lineales: costes fijos de acoplamiento

penalización de reserva rodante y exceso de mínimos técnicos

RESTRICCIONES:

- **potencia utilizada de cada grupo comprendida entre mínimo técnico y potencia disponible**
- **suma de mínimos técnicos inferior a demanda mínima**
- **suma de potencias utilizadas más potencia no suministrada igual a demanda máxima**
- **suma de potencias disponibles igual a demanda máxima por margen de reserva**

Función objetivo:

$$\min \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{nb} (E_{i,j} v_{i,j}) + E_{N+1} v_{N+1} + \sum_{i=1}^N (A_i c_i T) + P^e_m c^m T + P^d_R c^R T$$

Restricciones:

$$P_{i,1} A_i - P_i \leq 0 \quad i=1, \dots, N$$

$$P_{i,d} A_i - P_i \geq 0 \quad i=1, \dots, N$$

$$\sum_{i=1}^N (P_{i,1} A_i) + P^d_m - P^e_m = D_m$$

$$\sum_{i=1}^N P_i + P_{N+1} = D_M$$

$$\sum_{i=1}^N (P_{i,d} A_i) + P^d_R - P^e_R = (1+R) D_M$$

$$A_i \begin{cases} 0 \\ 1 \end{cases} \quad i=1, \dots, N$$

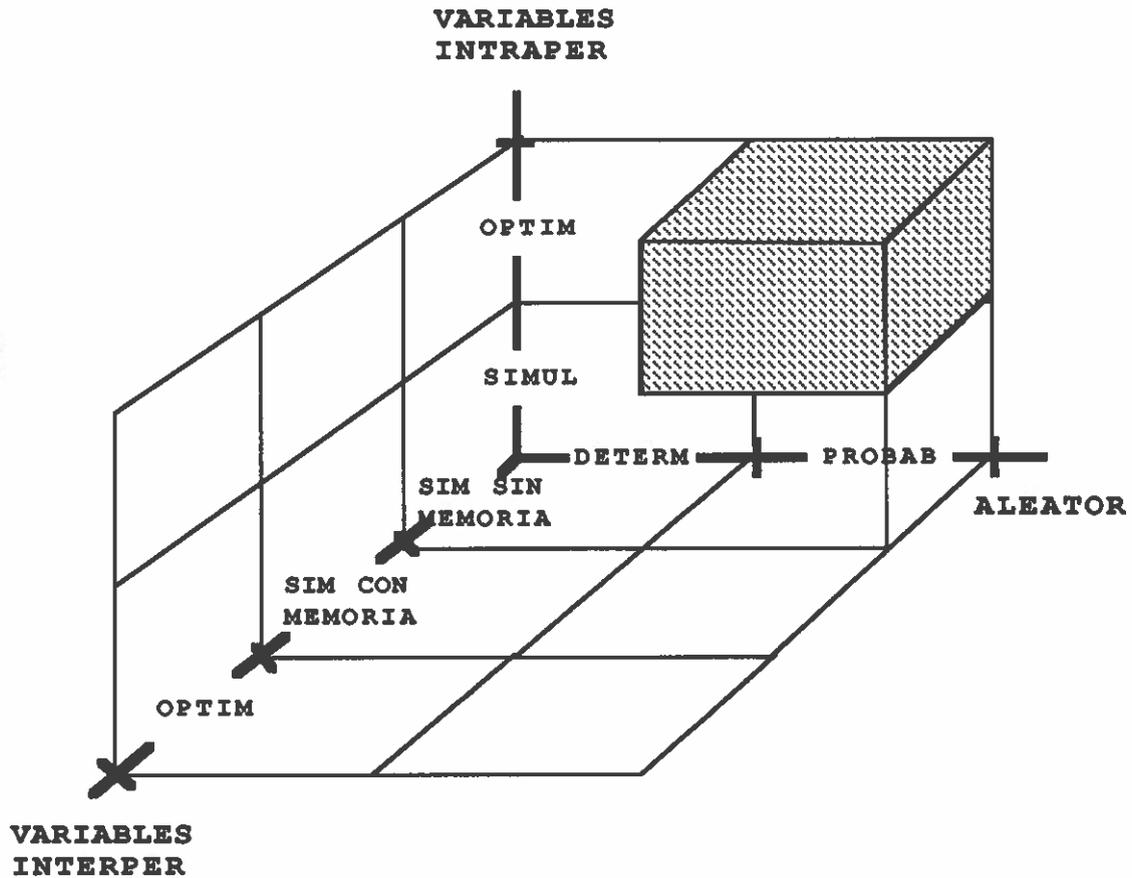
$$P^e_m \leq P^e_m$$

A_i decisión de acoplamiento o no

Número de variables: $2N+5$

Número de restricciones: $2N+3$

Coefficientes no nulos: $7N+5$



OPTIMIZACION INTRAPERIODO.

- Orden de carga (optimización)
- Restricciones que afectan al orden de carga (mínimos técnicos, reserva rodante)

TRATAMIENTO PROBABILISTA DE ALEATORIEDADES.

- Demanda, generación, producible hidráulico

INDEPENDENCIA ENTRE PERIODOS.

Estructura modular

Simulación aleatoriedad en generación

Optimiz en var discretas (acoplamiento)

Optimiz en var continuas

Código general de optimización MINOS

ESQUEMA GLOBAL

- Obtención de los grupos disponibles en cada simulación por sorteo de Monte Carlo.
- Control número de simulaciones a realizar. Técnicas de reducción de varianza.

- Optimización de la explotación en variables discretas.
- Obtención de solución entera inicial.
- Método de *branch and bound*.

- Optimización de la explotación en variables continuas.
- Modelo de optimización de función objetivo no lineal con restricciones lineales.

- Código de optimización.

Variables de interés: lote total

la esperanza S_n^2 prod de cada grupo permite determinar el intervalo de confianza

Intervalo de confianza del $100\alpha\%$

Si se calcula un gran n° de intervalos de confianza del $100\alpha\%$ cada uno con n observaciones (n elevado) la proporción de éstos que contienen la media será α .

Dado lote suficientemente grande medias de lotes son no correlacionadas y distribuidas según normal medias de lotes no aleatorias ~~no~~ normales indepetes e idénticamente distribuidas

IC < σ media | lote total
prod. grupos nucleares

VRT | n° aleatorias comunes
variables de control
estimación indirecta
esperanza condicional
muestras estratificadas
muestras por importancia

Variables artificiales

introducen correlación negativa entre observaciones
menor varianza de ambas disminuye

TRATAMIENTO DE LA ALEATORIEDAD

SIMULACION DE MONTE CARLO:

- **Media y cuasivarianza muestrales para cada simulación.**

$$\mu_n = \frac{1}{n} [(n-1) \mu_{n-1} + z_n]$$

$$s^2_n = \frac{1}{n-1} \left[(n-2) s^2_{n-1} + \frac{n}{n-1} (\mu_{n-1} - z_n)^2 \right]$$

- **Determinación intervalo de confianza.**
- **Número de muestras fijo con simulación por lotes. Divide el conjunto de simulaciones en lotes de tamaño prefijado.**
- **Procedimiento secuencial: detención del proceso cuando el intervalo de confianza menor o igual a v veces la media.**
$$t_{n-1, (1-\alpha)/2} \frac{s_n}{\sqrt{n}} \leq \frac{v}{2} \mu_n$$
$$s_n \leq \frac{v \sqrt{n}}{2 t_{n-1, (1-\alpha)/2}} \mu_n$$
- **Técnica de reducción de varianza de variables antitéticas (números aleatorios complementarios entre observaciones sucesivas)**

B & B

Infactible \rightarrow otra rama

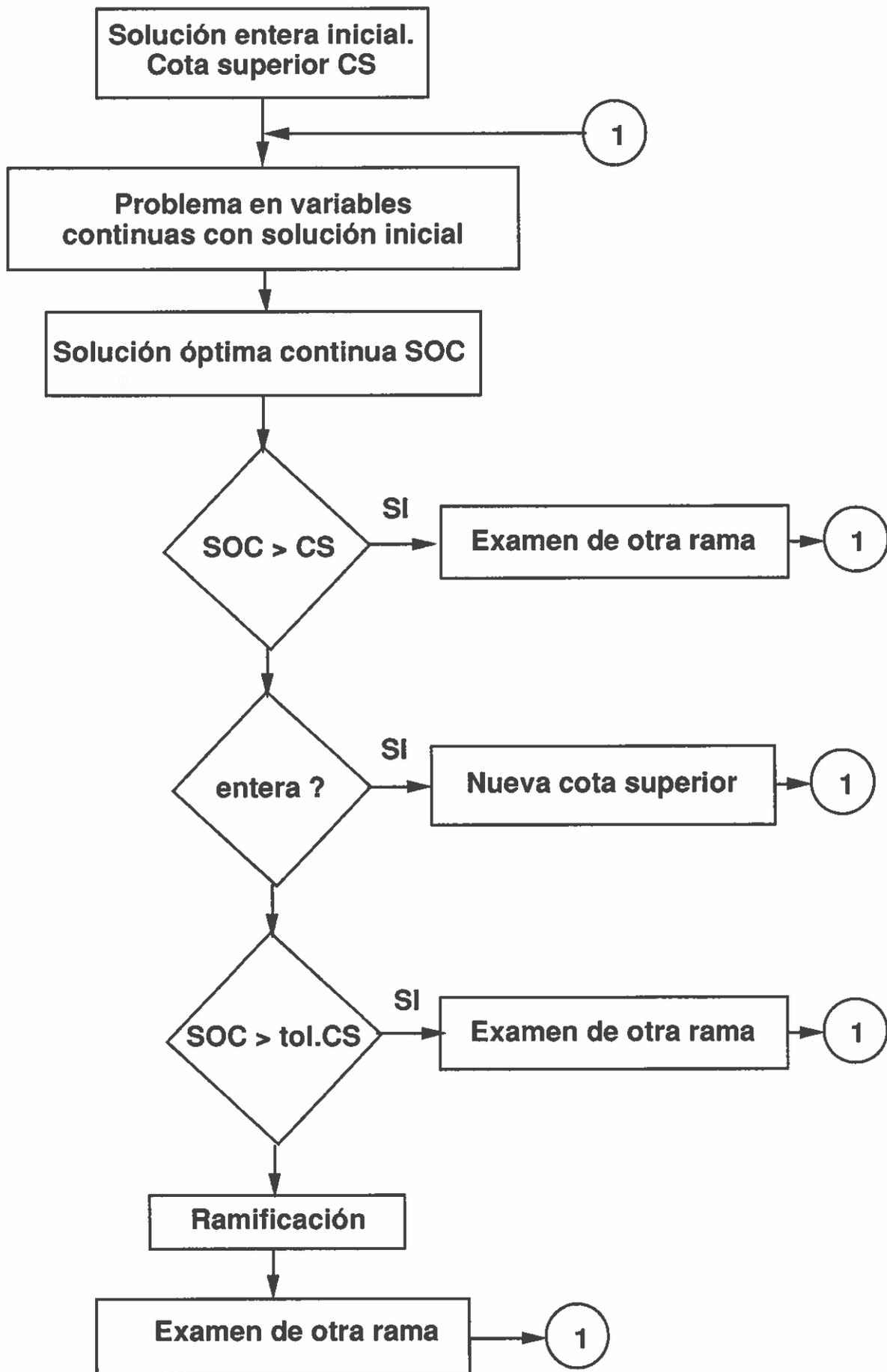
Error \rightarrow detención programa

Ramificación la 1^a en estar la más próxima a la soluc. entera

Examen otra rama: regla LIFO

Procedimiento sistemático de evaluación de problemas de optimización en var continuas para alcanzar la soluc. en var discretas

METODO DE BRANCH AND BOUND



MÉTODO DE BRANCH AND BOUND

Caso ejemplo

$$\max z = -3x_1 - 2x_2 + 10$$

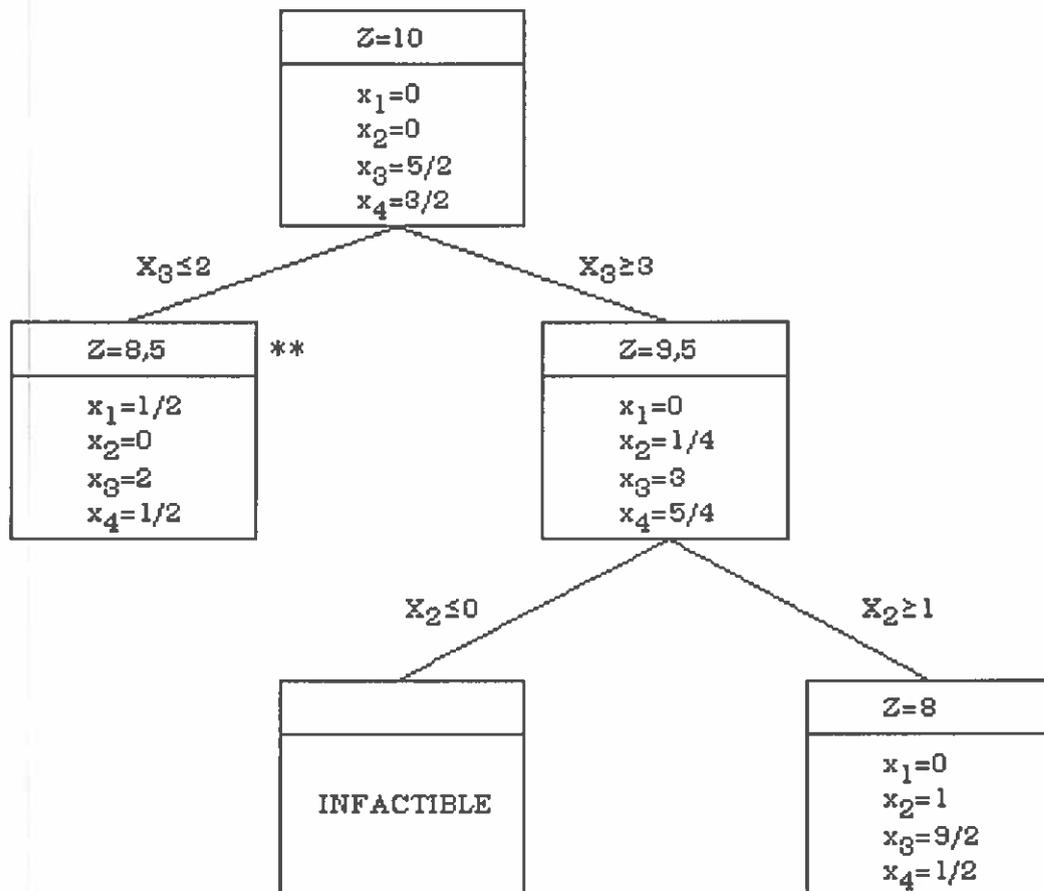
sujeto a:

$$x_1 - 2x_2 + x_3 = 5/2$$

$$2x_1 + x_2 + x_4 = 3/2$$

$$x_1, x_2, x_3, x_4 \geq 0$$

x_2 y x_3 enteras



MÉTODO DE BRANCH AND BOUND

Algoritmo:

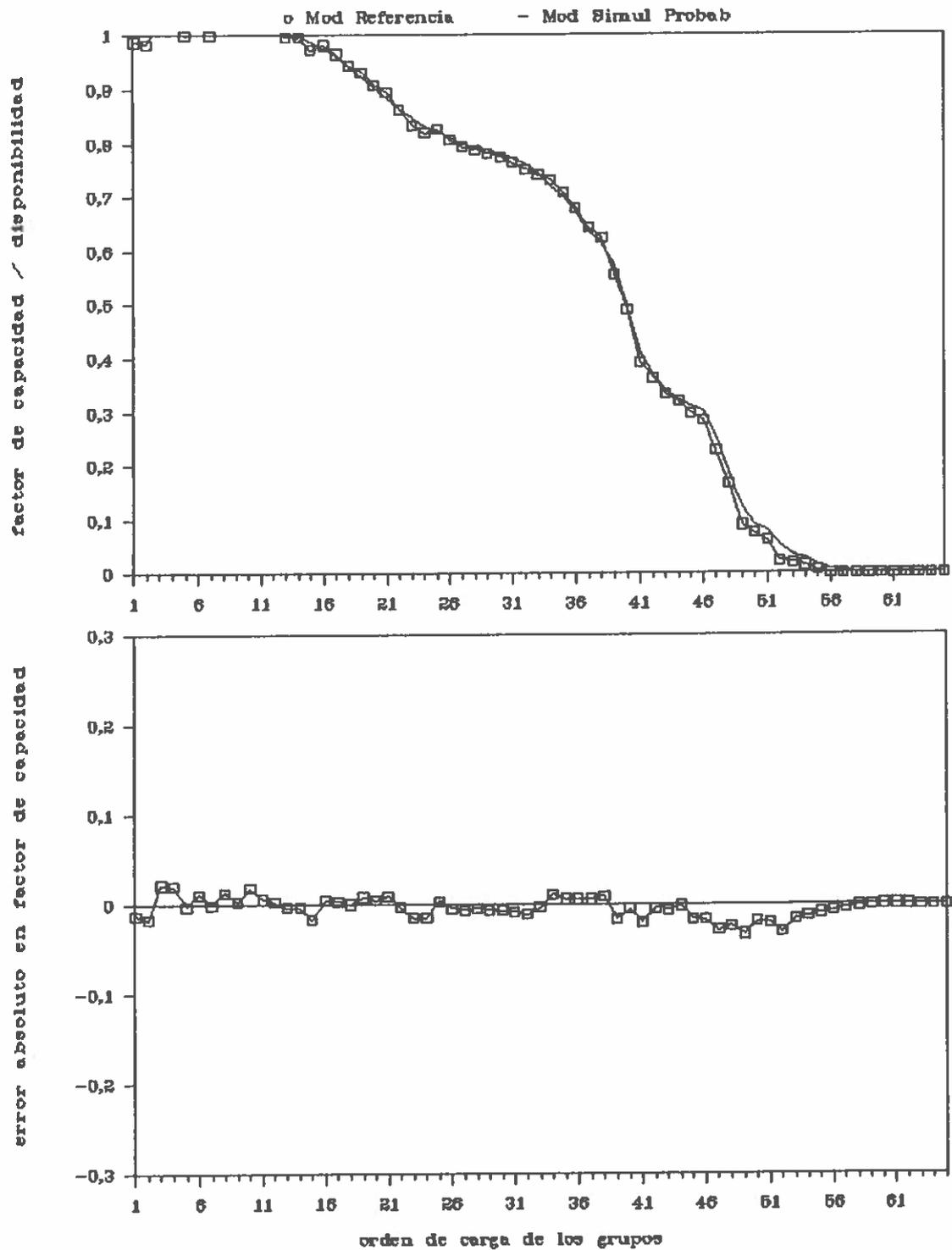
- i) Ordenación de los grupos atendiendo a costes variables medios crecientes
- ii) Obtención de cota superior inicial
- iii) Planteamiento del problema en variables continuas con solución inicial
- iv) Obtención del valor de la función objetivo
- v) Si éste es mayor que la cota superior se desecha la solución y se examina otra rama
- vi) Si la solución es entera con valor de la f.o. inferior a la cota se almacena como nueva cota superior y se examina otra rama.
- vii) Si no es entera y el valor de la f.o. es superior a $(100 - \text{tol})\%$ de la cota superior se desecha la solución por poco prometedora. Se examina otra rama a continuación.
- viii) Si no es entera y está fuera de tolerancia se crean dos ramas hijas de ésta, fijando la variable de acoplamiento no entera a 0 y 1 de manera que la primera en ser examinada sea la de valor más cercano al extremo.
- ix) Examen de otra rama del árbol según la regla de la última que entra es la primera en ser examinada. Antes de lanzar la optimización se comprueba si la solución es factible.

- x) **El proceso acaba cuando se han examinado todas las ramas. La solución óptima es la cota superior en ese momento.**

Erros muy pequeños
Homogéneamente distribuidos
En ambos sentidos

MODELO DE REFERENCIA

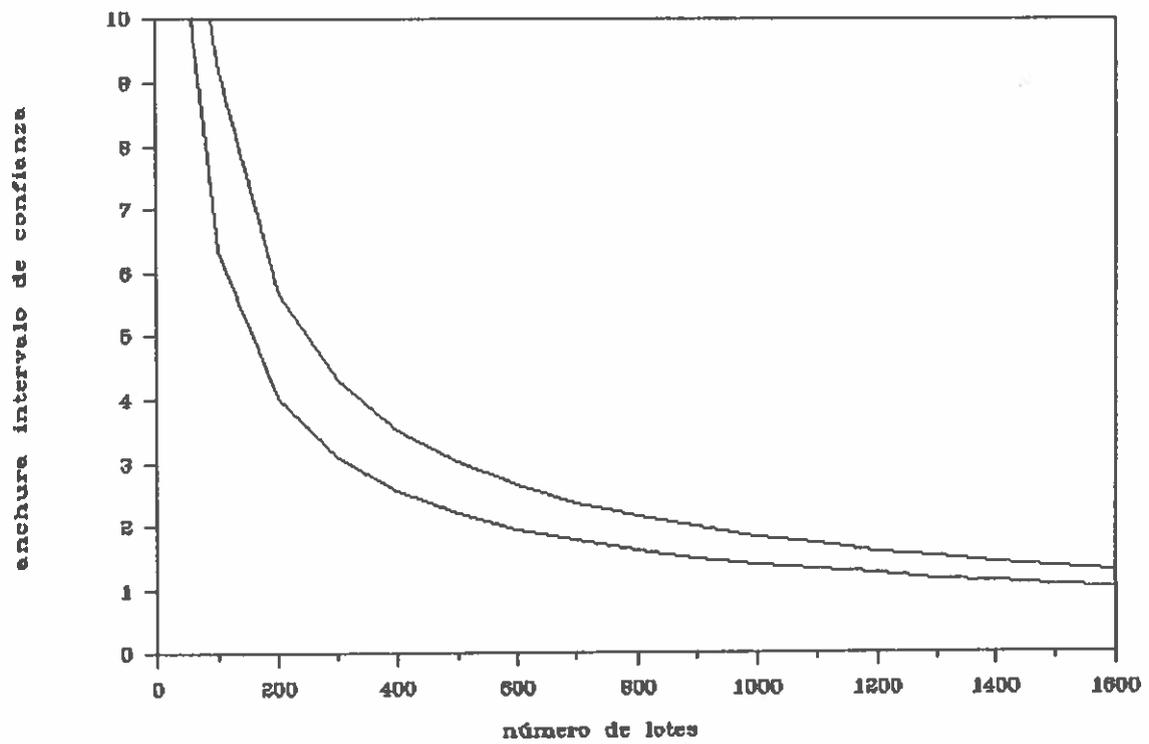
Validación del modelo



MODELO DE REFERENCIA

Ajuste del proceso de simulación

Determinación del número de simulaciones y tamaño de lote adecuados

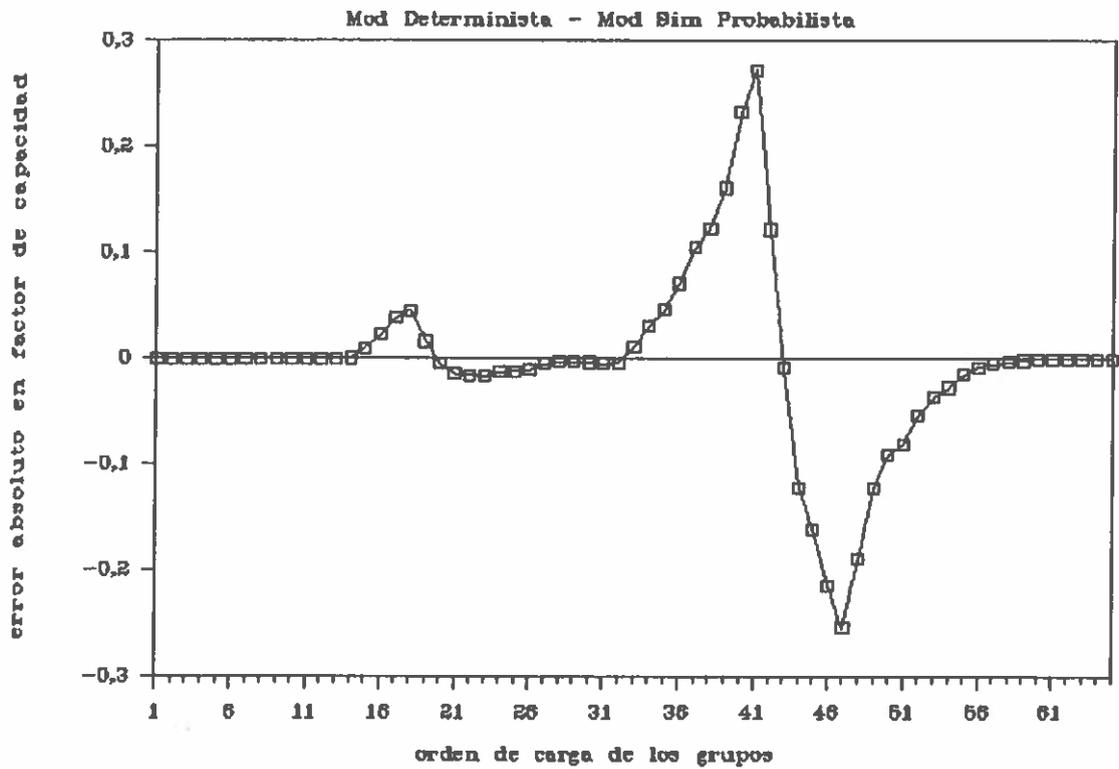
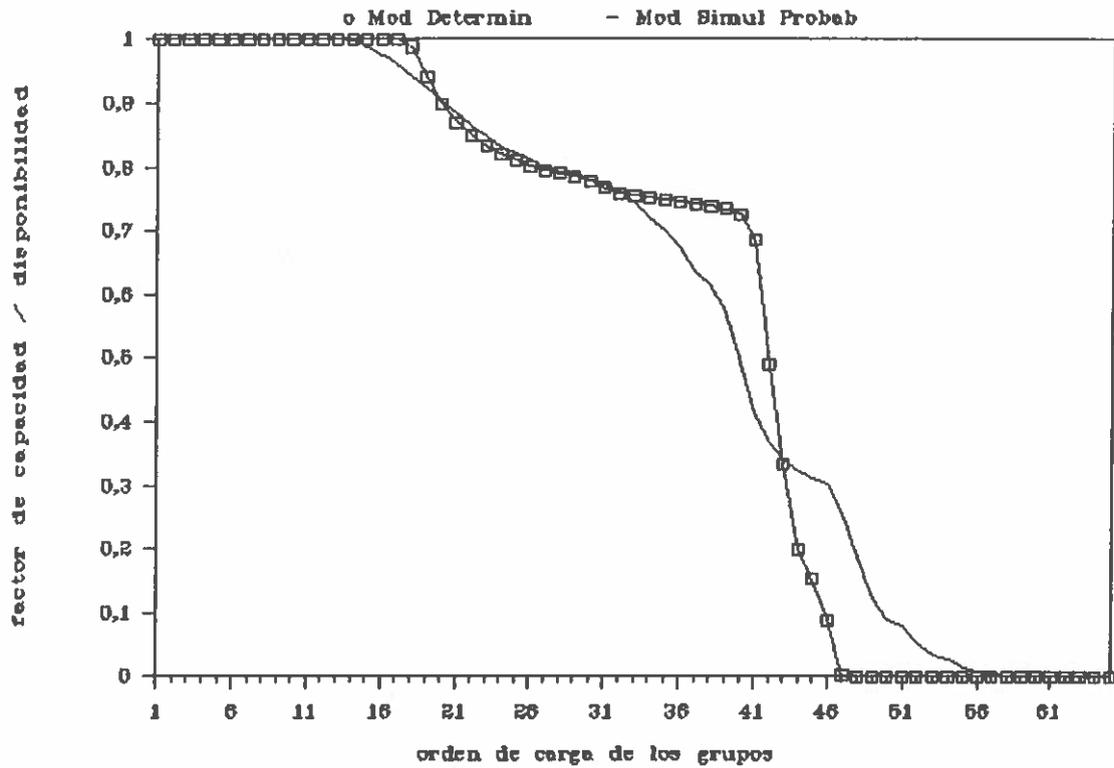


1. PLANIFICACION DE LA EXPLOTACION DE LA GENERACION A MEDIO PLAZO.
2. MODELOS DE EXPLOTACION A MEDIO PLAZO DE LA GENERACION.
3. COMPARACION ENTRE MODELOS.
4. MODELOS DE OPTIMIZACION DETERMINISTA.
5. MODELOS DE SIMULACION PROBABILISTA.
6. MODELO DE OPTIMIZACION PROBABILISTA.
7. VALORACION DE MODELOS.
8. CONCLUSIONES.

- Muchos modelos son deterministas
- Centrales no producen en det si lo hacen en prob.
- Misma escala comparación anterior
- Errores mucho más importantes
- LOLP y ENS
- Impuestos en costes 2:2% (poca variación costes FO y CN y CI)

Centrales más baratas generan más en determin.

TRATAMIENTO DE LA ALEATORIEDAD DE LA GENERACION TÉRMICA: DETERMINISTA VS PROBABILISTA



UTILIZACION DE CRITERIO HEURISTICO VS OPTIMIZACION DE LA GESTION DEL PRODUCIBLE HIDRAULICO.

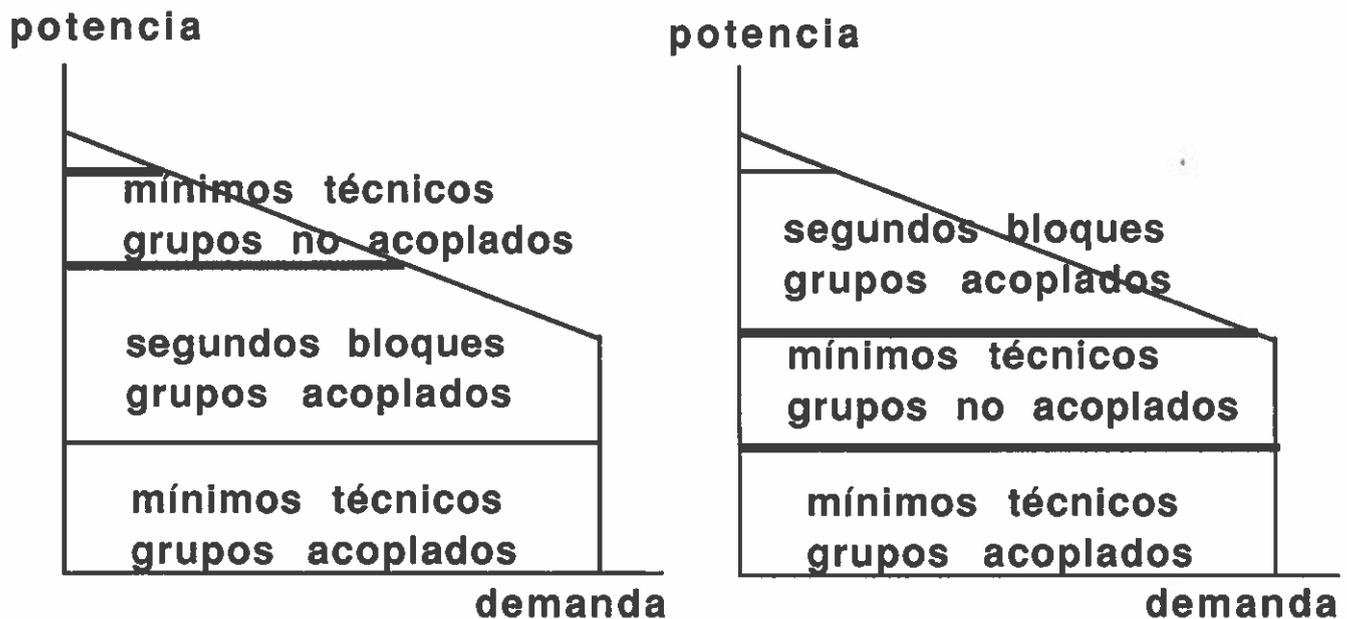
CRITERIO:

reparto del producible hidráulico proporcionalmente a la punta de demanda de cada escenario de demanda.

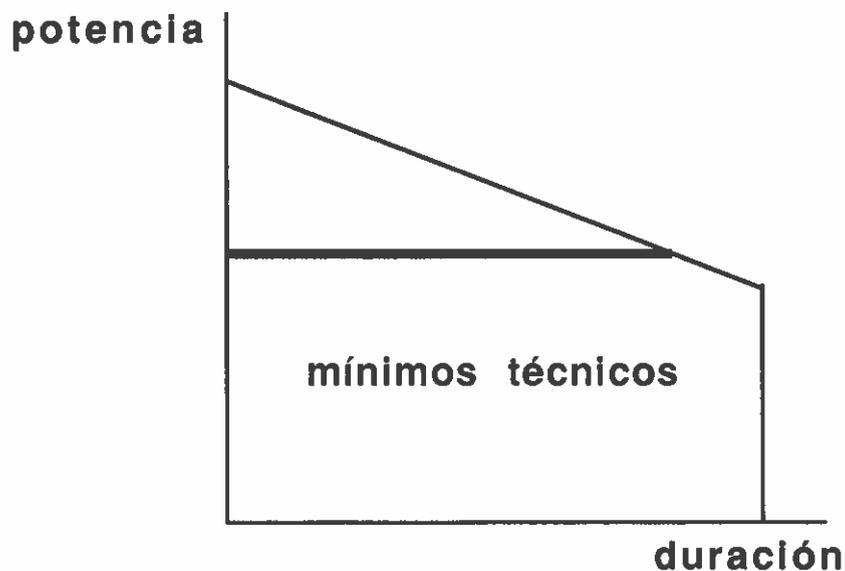
- **Aumenta la necesidad de realizar bombeo puro y estacional.**
- **Aumento de la producción de carbón nacional y de importación para efectuar el bombeo.**
- **Aumento del coste de explotación en un + 0,5 %.**

TRATAMIENTO MINIMOS TÉCNICOS

- El orden de carga depende de los grupos disponibles. Error asociado a considerar únicamente un orden de carga (**ERROR TIPO I**).



- Existen restricciones que afectan el orden de carga. Error por la no inclusión de dichas restricciones (**ERROR TIPO II**).

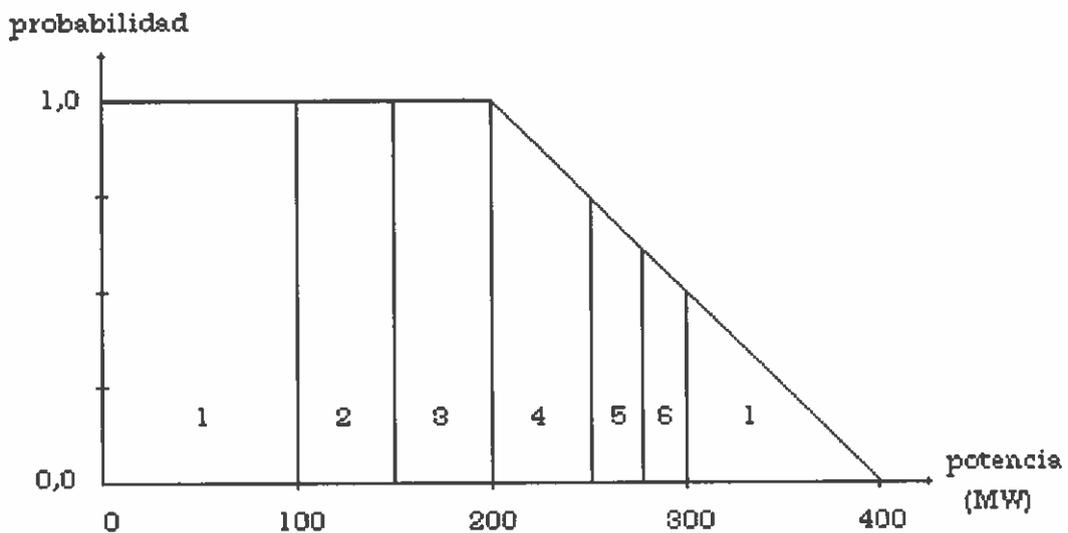


Caso ejemplo

Gr	$P_{i,n}$	$P_{i,1}$	$q_{i,1}$	$q_{i,2}$	$v_{i,1}$	$v_{i,2}$
	(MW)		(p.u.)		(PTA/kWh)	
1	200,0	100,0	0,05	0,05	1,0	1,0
2	150,0	50,0	0,05	0,05	2,0	2,0
3	100,0	50,0	0,05	0,05	3,0	3,0
4	100,0	50,0	0,05	0,05	4,0	4,0
5	50,0	25,0	0,05	0,05	5,0	5,0
6	50,0	25,0	0,05	0,05	6,0	6,0
	650,0	300,0				

Datos de la generación del sistema eléctrico.

No todos los grupos son necesarios para generar la D_m



Curva duración-carga.

- Enumeración estados 2^6 (64)

- Desplazo grupos (mt y 2° bloque)

Sin considerar restricciones

- Los órdenes son cada vez distintos y no uno
único

-

Orden más probable 1-2-3

Grupos acoplados	Probabilidad (p.u.)
1	0,0
1-2	0,0
1-2-3	0,7695
1-2-3-4	0,155925
1-2-3-4-5	0,0475875
1-2-3-4-5-6	0,0269875

Probabilidad de acoplar exactamente un subconjunto de grupos.

Grupo	Probabilidad estar acoplado (p.u.)
1	0,95
2	0,95
3	0,95
4	0,218975
5	0,07084625
6	0,025638125

Probabilidad de acoplamiento de cada grupo.

EXACTO 1, 2 Y 3 ACOPLADOS 1, 2, 3 Y 4 ACOPLADOS

Grupo	Energía (GWh)		Energía (GWh)		Energía (GWh)		total		
	bloque 1	bloque 2	bloque 1	bloque 2	bloque 1	bloque 2			
1	95,0000	66,3975	161,3975	95,0000	69,1594	161,1594*	95,0000	48,3321	143,3321
2	47,5000	26,4192	73,9192	47,5000	29,1797	76,6797	47,5000	13,2019	60,7019
3	47,5000	2,6242	50,1242	47,5000	4,9922	52,4922	47,5000	3,0289	50,5289
4	10,4270	1,1700	11,5970	3,6404	1,5982	5,2386	42,4093	1,5982	44,0075
5	1,7302	0,2556	1,9858	0,5482	0,3120	0,8602	0,5482	0,3120	0,8602
6	0,6198	0,1307	0,7515	0,2132	0,1307	0,3439	0,2132	0,1307	0,3439
EENS			0,2260			0,2260			0,2260
Total			300,0000			300,0000			300,0000

CRITERIO HEURISTICO EN SIMULACION PROBABILISTA.

- i) Ordenación por costes variables medios crecientes.**
- ii) Separación de los grupos térmicos en dos subconjuntos:**
 - ACOPLADOS**
(aquéllos que se necesitan para cubrir la demanda máxima más la reserva especificada)
 - NO ACOPLADOS**
- iii) Consideración de las restricciones que alteran este orden de carga (mínimos técnicos, reserva rodante).**

OPTIMIZACION DEL ORDEN DE CARGA EN SIMULACION PROBABILISTA.

Despacho de los grupos en un único orden de carga según simulación probabilista.

Optimización de la decisión de acoplamiento de los grupos.

modelo intrínseco de SP

Función objetivo:

$$\min \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{nb} (E_{i,j} v_{i,j}) + E_{N+1} v_{N+1} + \sum_{i=1}^N (A_i c_i T) + P^e_m c^m T + P^d_R c^R T$$

Restricciones:

$$\sum_{i=1}^N (P_{i,1} A_i) + P^d_m - P^e_m = D_m$$

$$\sum_{i=1}^N (P_{i,n} A_i) + P^d_R - P^e_R = (1+R) D_M$$

$$A_i \begin{cases} 0 \\ 1 \end{cases} \quad i=1, \dots, N$$

$$P^e_m \leq P^e_m$$

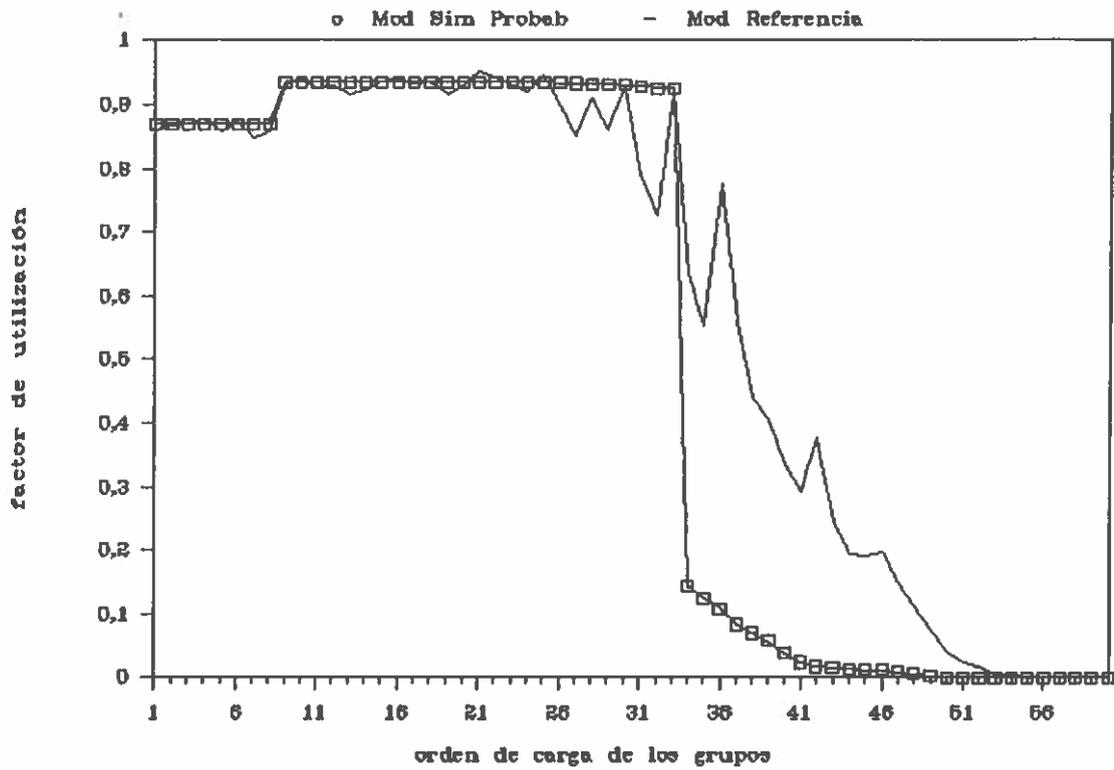
A_i decisión de acoplamiento en el primer subconjunto (acoplados) o en el segundo (no acoplados)

ERROR TIPO I

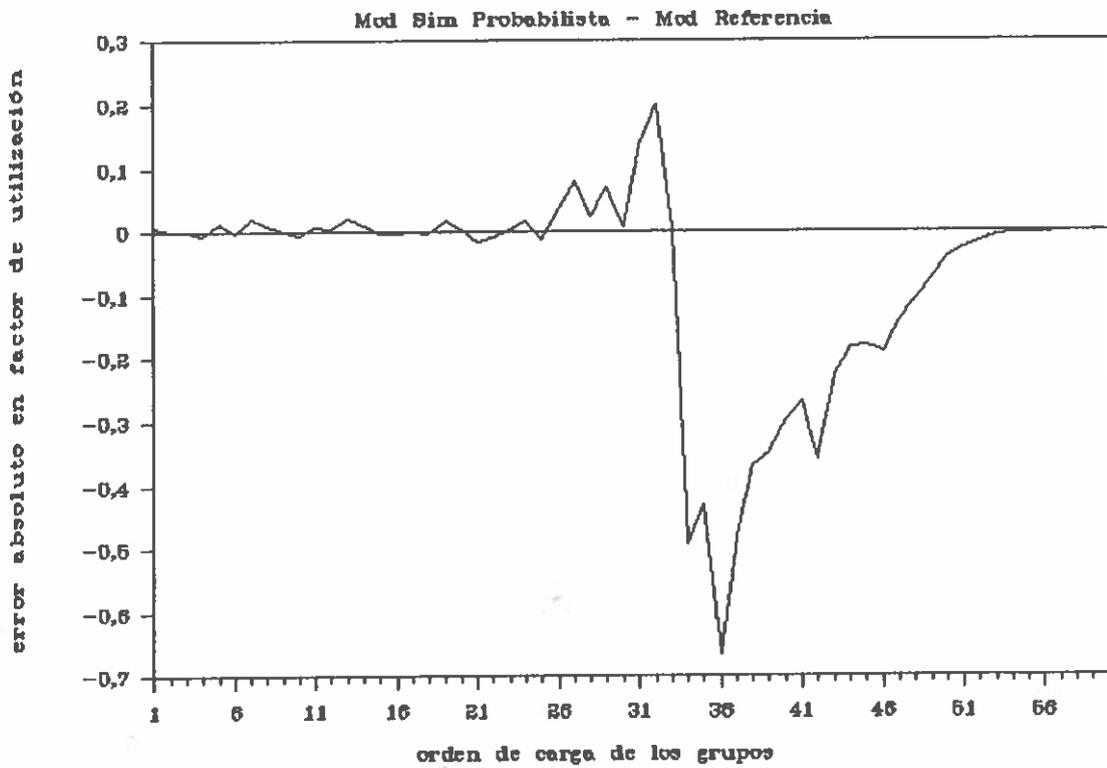
- **Primeros puntos de válvula de grupos no acoplados tienen factores de utilización inferiores (error hasta un 0,44).**
- **Segundos puntos de válvula de grupos acoplados tienen errores positivos en los factores de utilización (error hasta un 0,12).**
- **Error en el coste total de explotación alcanza un 1,8 %.**

- * Errores muy importantes en factores capacidad
- * No escalón en producciones grupas
- * MT a partir de cierto pto no producen

PRIMEROS PUNTOS DE VALVULA

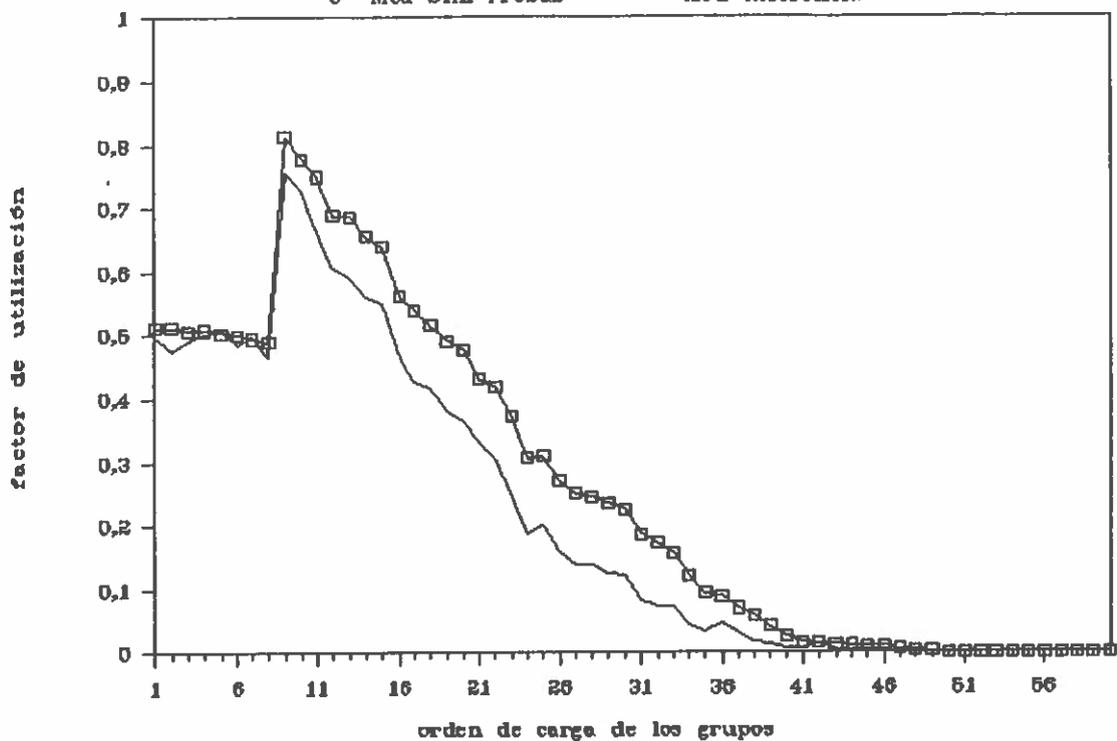


PRIMEROS PUNTOS DE VALVULA



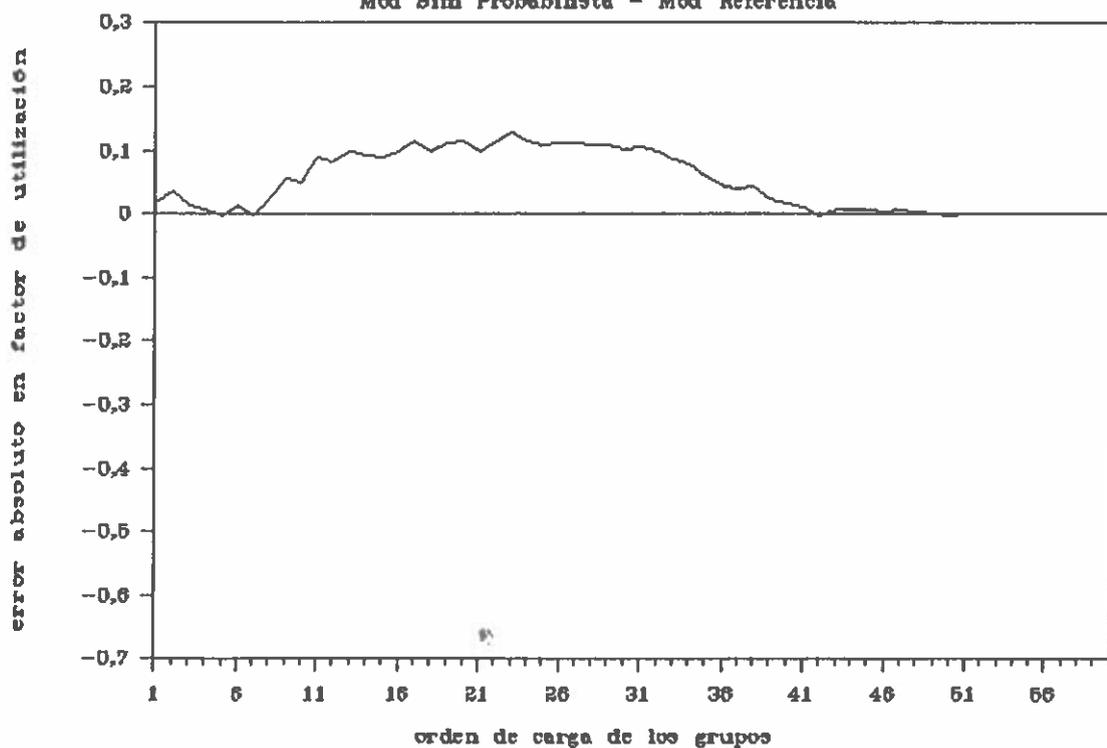
SEGUNDOS PUNTOS DE VALVULA

o Mod Sim Probab - Mod Referencia



SEGUNDOS PUNTOS DE VALVULA

Mod Sim Probabilista - Mod Referencia

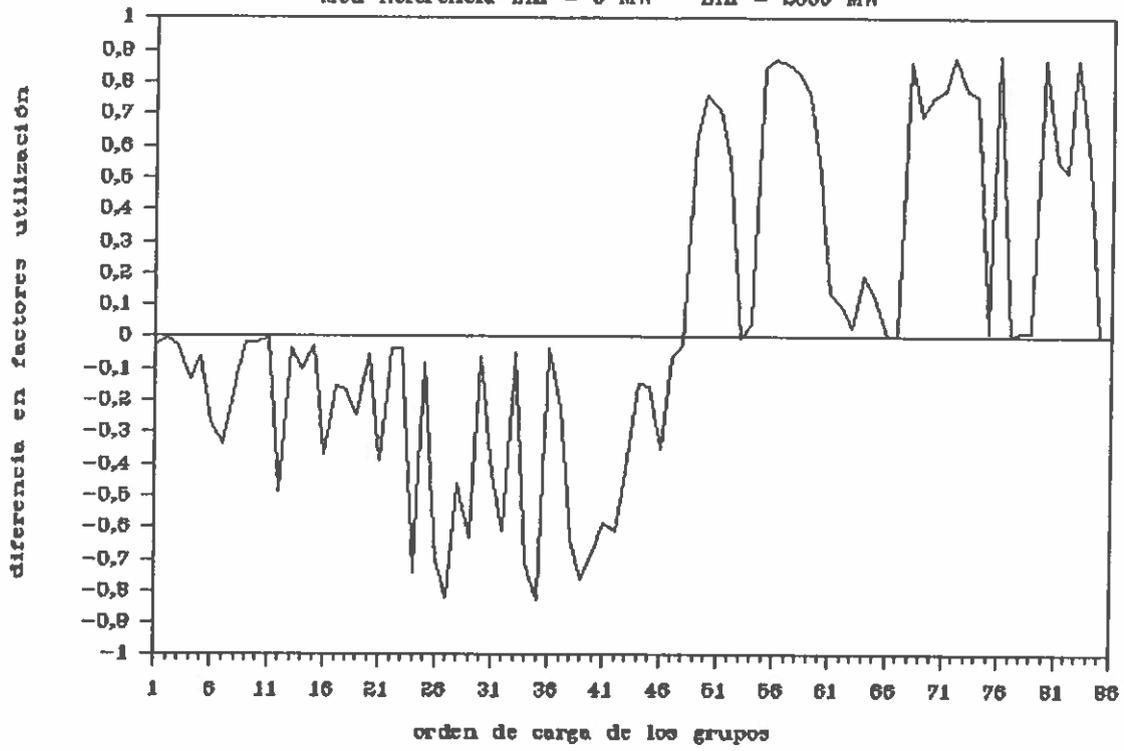


ERROR TIPO II

- **Decremento en generación de grupos con mínimos técnicos elevados (normalmente costes variables inferiores) y viceversa. Cambios en factores de utilización de hasta 0,8.**
- **Incremento exponencial en costes totales de explotación con respecto al excedente de los mínimos técnicos con respecto a la demanda mínima. Un 21,5 % si no se permite exceso a un 0,5 % si se permite un excedente de 1500 MW.**
- **Aproximadamente el factor de utilización de cada grupo es inversamente proporcional al producto del coeficiente de su mínimo técnico por su coste variable.**

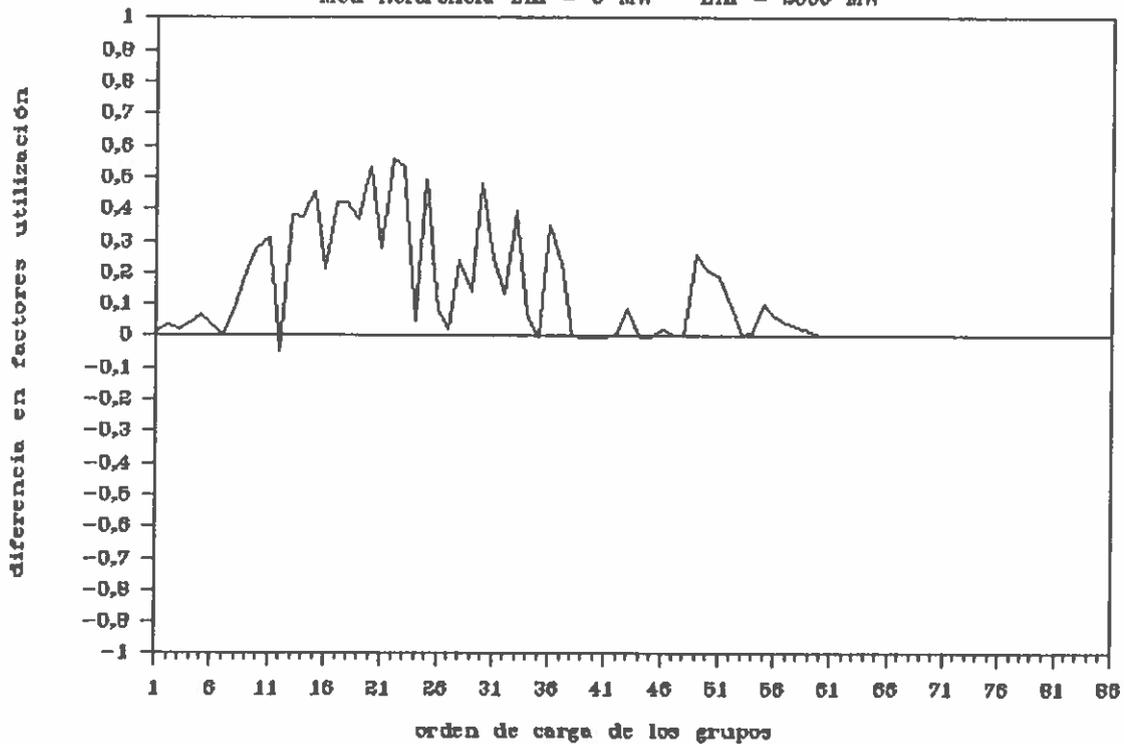
Primeros puntos de válvula

Mod Referencia $E_m = 0$ MW -- $E_m = 2500$ MW



Segundos puntos de válvula

Mod Referencia $E_m = 0$ MW -- $E_m = 2500$ MW



REPRESENTACION DE LA MONOTONA DE DEMANDA

NUMÉRICA: (PRÓXIMO)

- Errores de estabilidad numérica desaparecen al aumentar suficientemente la precisión.

POR ESCALONES: (OD) MODEX

- La relación entre bloque de punta y demanda máxima es aproximadamente igual a la reducción en potencia térmica por tratamiento determinista de la aleatoriedad en generación. El conjunto de grupos acoplados será similar.
- La demanda en el bloque de valle supera ampliamente la demanda mínima. Se producen excedentes en valle no considerados y que obligan a bombeo por razón de mínimos técnicos.

ANALITICA: (EVEAS)

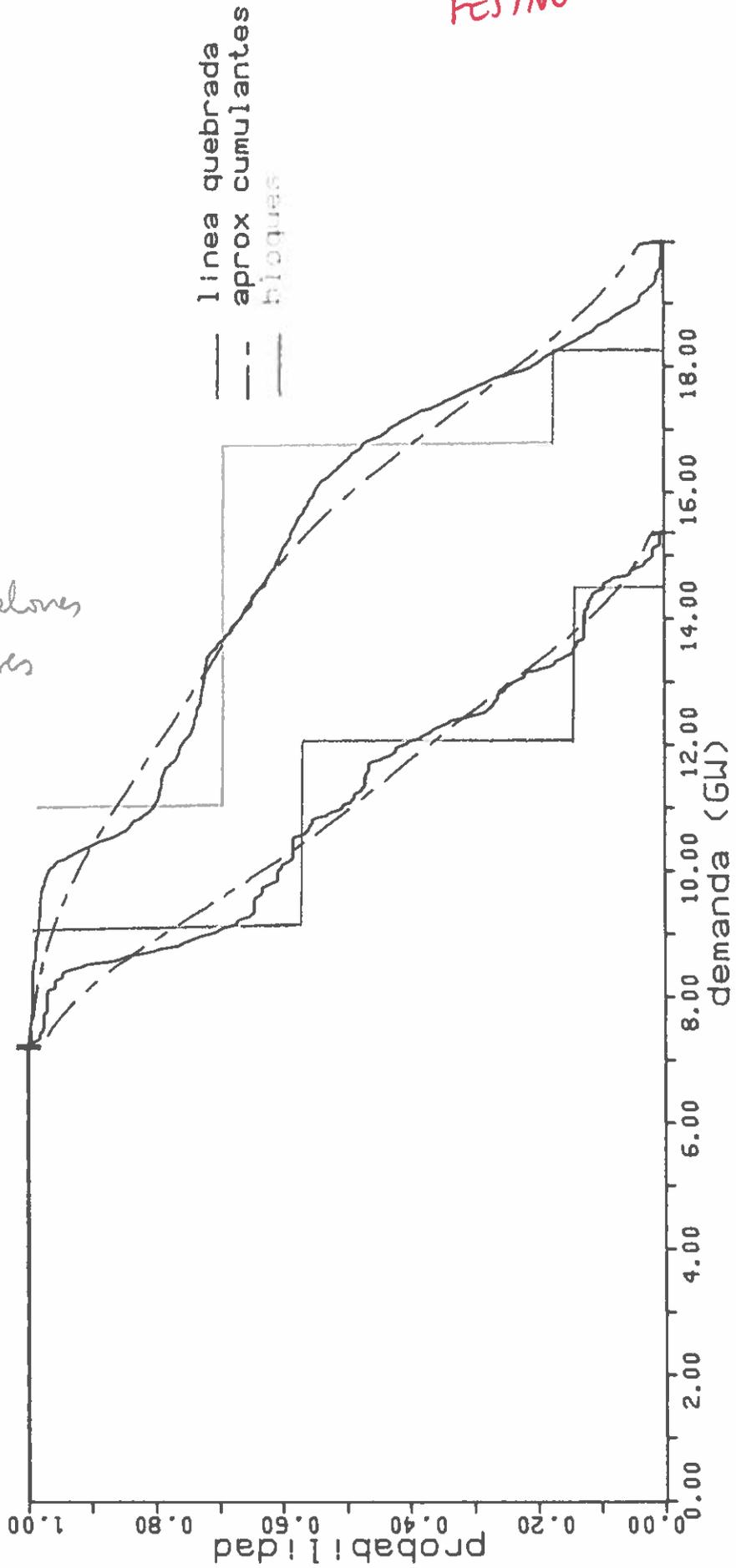
- La aproximación analítica por cumulantes a las curvas reales se ajusta adecuadamente en la zona intermedia de la curva duración-carga inicial.
- Pueden aparecer discrepancias si los períodos son muy cortos.
- En los puntos de demanda mínima y máxima de la curva se producen errores sistemáticos. Estos últimos pueden originar valores erróneos de medidas de fiabilidad.
- Sin embargo, los errores en las producciones de los grupos no son significativos.

ENERO 1986

laborable festivo

Dmax	19975	15382
Pnta	18242	14488
DIF	1733	893
Dmin	7191	7229
Ulle	10975	9041
DIF	-3784	-1812

*Por qué es ahora
tan disperso*



LABOR.
FESTIVO

Qué problemas presenta OP / demande
SP / determinista
orden de carga único

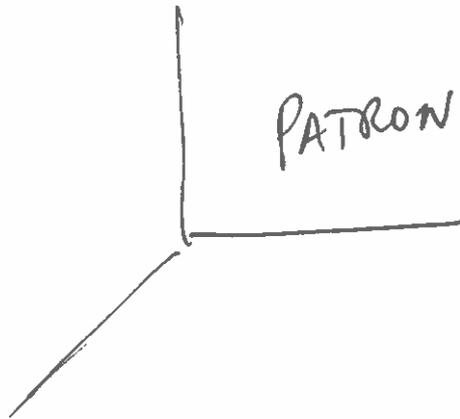
1. PLANIFICACION DE LA EXPLOTACION DE LA GENERACION A MEDIO PLAZO.
2. MODELOS DE EXPLOTACION A MEDIO PLAZO DE LA GENERACION.
3. COMPARACION ENTRE MODELOS.
4. MODELOS DE OPTIMIZACION DETERMINISTA.
5. MODELOS DE SIMULACION PROBABILISTA.
6. MODELO DE OPTIMIZACION PROBABILISTA.
7. VALORACION DE MODELOS.
8. CONCLUSIONES.

Ventajas:
INTER

rapidez
precisión suficiente
aleatoriedad en generación
detalle término/medio importante
pequeno en SP

INTRA:

mejor en varios aspectos
esfuerzo en reducción tiempos cálculos
interfaz M/MOS
fuerza de simulación
no optimizar cuando se
conoce el resultado



DEFINICION DE UN MODELO PATRON

MODELO DE EXPLOTACION Y COORDINACION DE LA EXPLOTACION INTERPERIODO.

Variables de decisión:

- reparto y coordinación del producible hidráulico
- programación del mantenimiento de la unidades térmicas
- gestión del ciclo del combustible nuclear y revisión de estas unidades

Horizonte temporal:

- varios años divididos en períodos de una a varias semanas

Metodología:

- descomposición generalizada de Benders

MODELO DE EXPLOTACION Y COORDINACION DE LA EXPLOTACION INTRAPERIODO.

Variables de decisión:

- acoplamiento de los grupos térmicos y nucleares
- despacho de potencia y energía hidráulica
- despacho de los grupos de bombeo

Horizonte temporal:

- varias semanas divididas en subperíodos

Metodología:

- optimización no lineal en cada período con tratamiento por simulación de las aleatoriedades

APORTACIONES

- **Método original de clasificación de los modelos.**
- **Taxonomía y estudio en profundidad de las características significativas.**
- **Implantación de versiones prototipo de nuevos modelos desarrollados como patrones para establecer comparaciones.**
- **Análisis comparativo individualizado de las características.**
- **Aportaciones incorporables a otros modelos ya existentes.**
- **Evaluación detallada de la representación de la explotación para el sistema eléctrico peninsular español.**
- **Propuesta de un nuevo modelo patrón de planificación de la explotación a medio plazo.**
- **Especificación preliminar de un sistema experto que ayude en la elección del modelo más adecuado para una aplicación determinada. Sistema que plasma el conocimiento adquirido en la tesis.**

LINEAS DE CONTINUACION

- **Desarrollo del modelo de optimización y coordinación de la explotación interperíodo especificado**
- **LLevar el modelo de optimización y coordinación de la explotación intraperíodo desarrollado hasta su utilización comercial.**
- **Desarrollo de un algoritmo de despacho adecuado de los mínimos técnicos en un modelo de simulación probabilista**