



Aplicación de la optimización a la toma de decisiones en el mercado eléctrico

Andrés Ramos

Universidad Pontificia Comillas, Madrid

24 de octubre de 2005

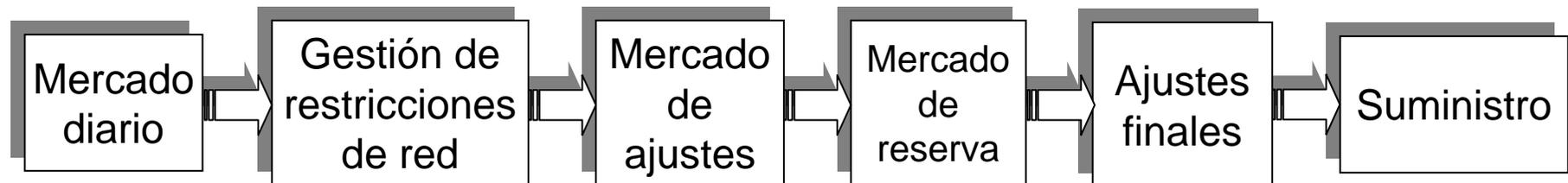
Equipo de trabajo

- Álvaro Baíllo
- Santiago Cerisola
- Emilio Gómez-Villalva
- Jesús María Latorre
- Michel Rivier
- Mariano Ventosa
- Begoña Vitoriano

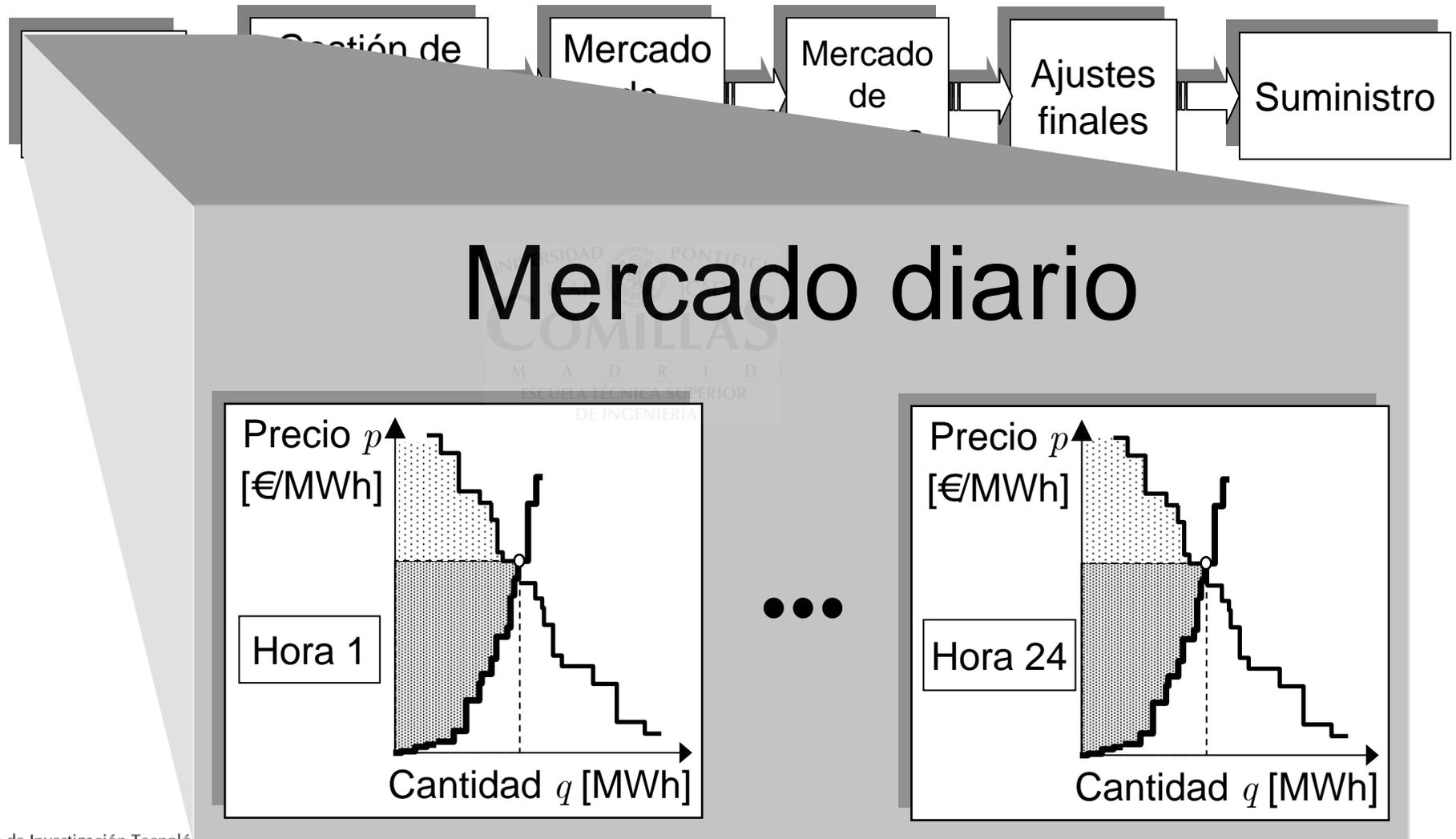


Mercado de producción de energía eléctrica (i)

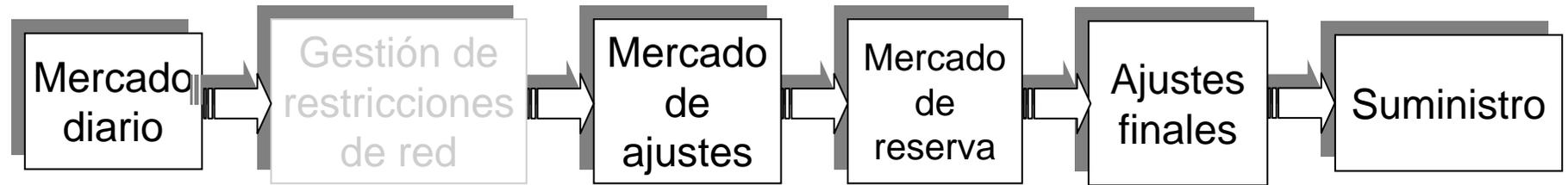
- Comienza a 1 de enero de 1998
- **El mercado de producción de energía eléctrica** normalmente se organiza como una secuencia de mecanismos de mercado.
 - ✓ Mercado diario
 - ✓ Solución de restricciones técnicas
 - ✓ Mercados intradiarios o de ajustes
 - ✓ Mercado de reserva



Mercado de producción de energía eléctrica (ii)

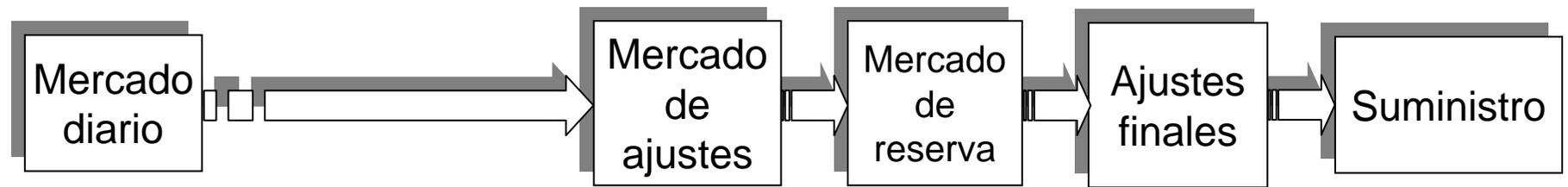


Mercado de producción de energía eléctrica (iv)



Hipótesis: la red no impone restricciones significativas para la transferencia de energía

Mercado de producción de energía eléctrica (v)



Hipótesis: el volumen de negocio disminuye a medida que se aproxima el momento del suministro



Mercado de producción de energía eléctrica (vi)

- **Energía contratada** en mercados diario e intradiarios en GWh en los últimos años

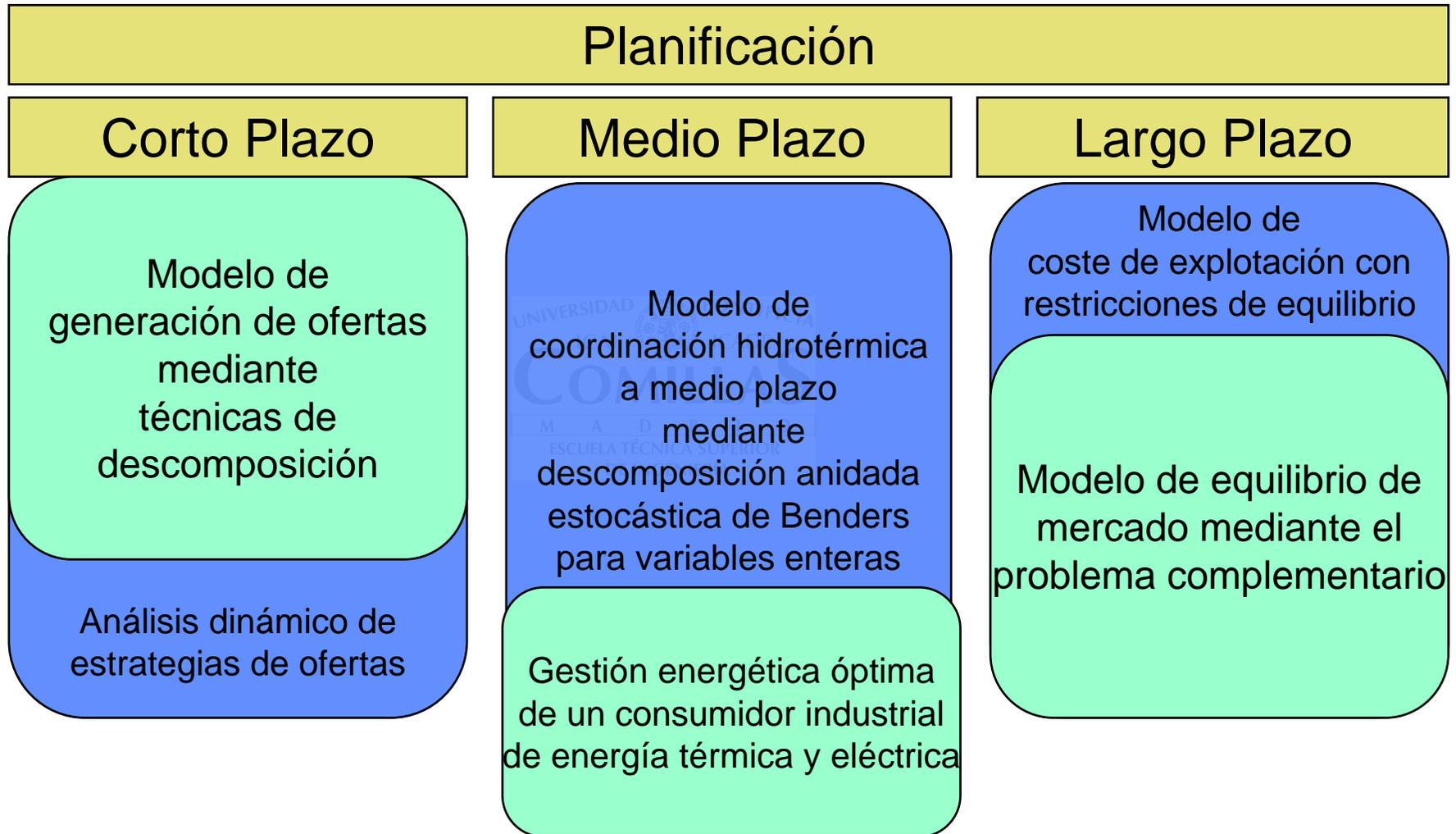
	M. diario	M. intrad.
2000	171556	11487
2001	177363	14808
2002	184602	12657
2003	198046	17807
2004	201773	24988

- **Volumen económico** en M€

	M. diario	M. intrad.
2000	5461	352
2001	5587	452
2002	7178	456
2003	5992	506
2004	5800	749

UNIVERSIDAD
ICAI
COMILLAS
M A D R I D
ESCUELA TÉCNICA
DE INGENIERÍA

Líneas de trabajo



Contenido

1. Modelo de coste de explotación a medio plazo con restricciones de equilibrio
2. Modelo de equilibrio de mercado mediante el problema complementario
3. Modelo de generación de ofertas mediante técnicas de descomposición
4. Análisis dinámico de estrategias de ofertas
5. Modelo de coordinación hidrotérmica a medio plazo mediante descomposición anidada estocástica de Benders para variables enteras
6. Gestión energética óptima de un consumidor industrial de energía térmica y eléctrica

Modelo de coste de explotación a medio plazo con restricciones de equilibrio

➤ Publicaciones

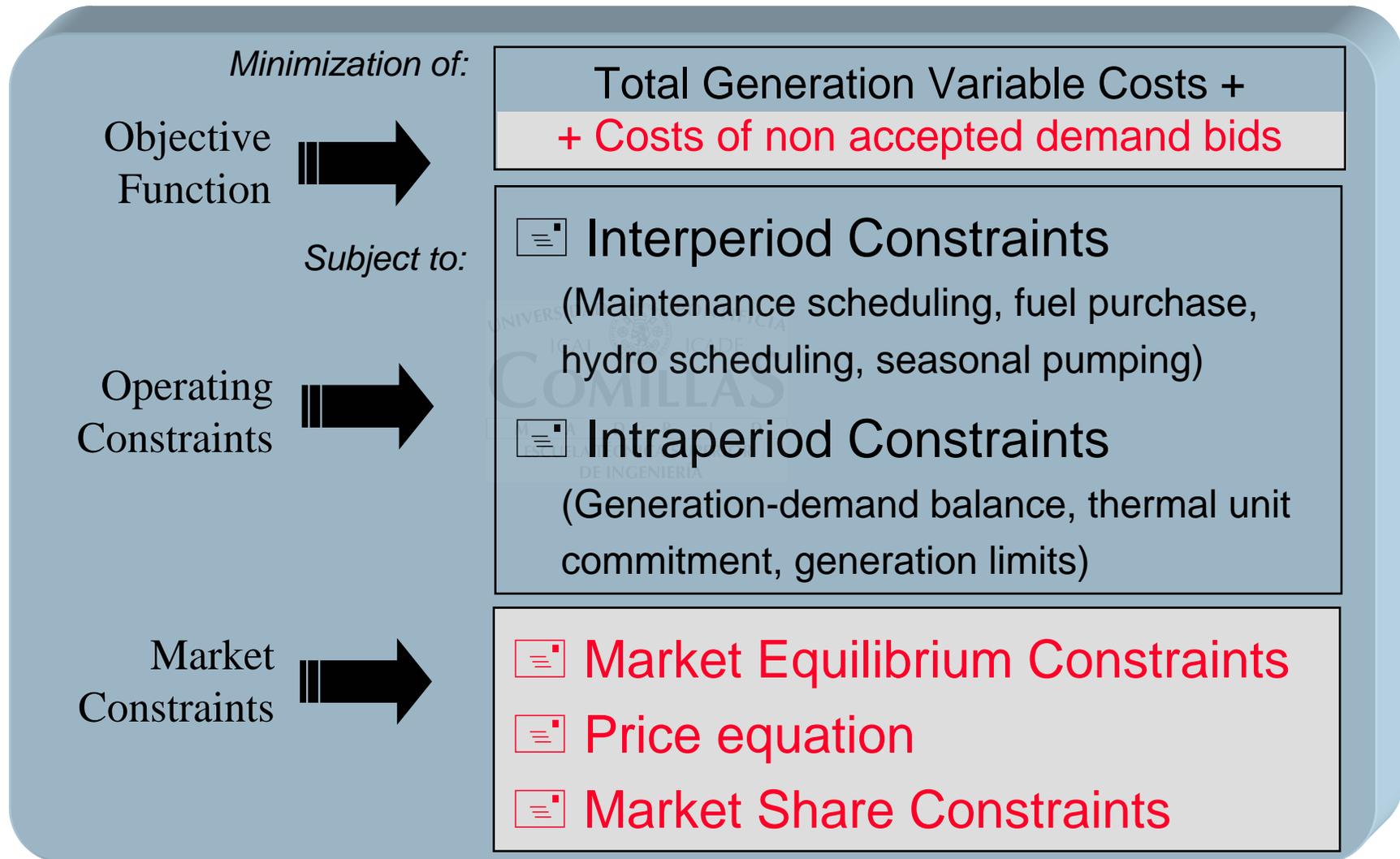
- ✓ A. Ramos, M. Ventosa, M. Rivier, A. Santamaría *An Iterative Algorithm for Profit Maximization by Market Equilibrium Constraints* 14th Power Systems Computation Conference (PSCC '02) Seville, Spain June 2002
- ✓ A. Ramos, M. Ventosa, M. Rivier *Modeling competition in electric energy markets by equilibrium constraints* Utilities Policy Vol 7 (4) pp. 233-242 April 1998

ESCUOLA TÉCNICA SUPERIOR
DE INGENIERÍA

Model Description

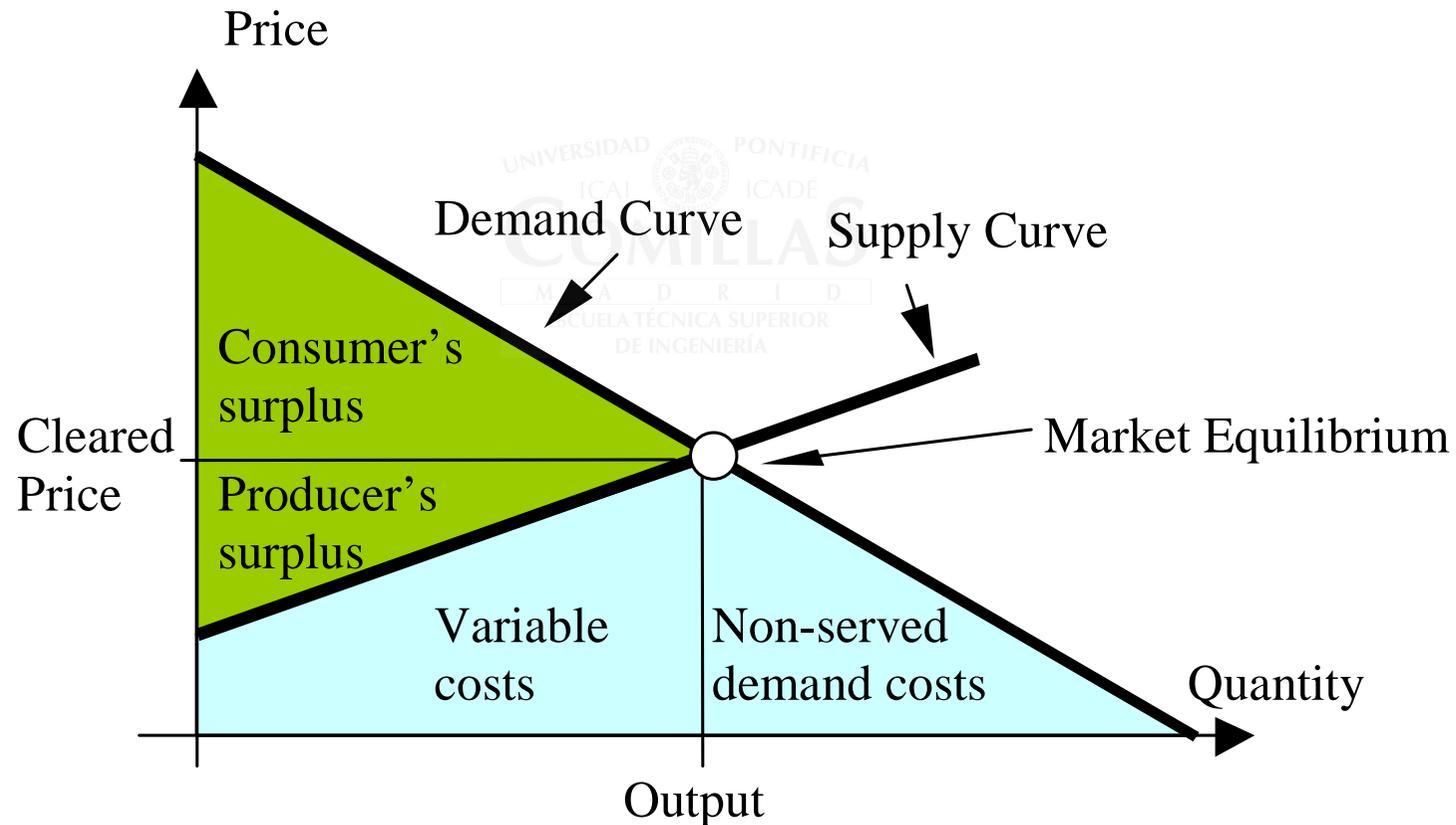
- Based on a detailed production cost model
 - ✓ Detailed representation of operation constraints
 - ✓ Decision variables are generator output levels
 - ✓ Determine the cheapest **commitment** and operation of the **hydrothermal** system
- **Market equilibrium** among firms represented by a set of **additional constraints**. By these constraints each **strategic agent maximizes its profit** (revenues minus costs)
 - ✓ Determine the output level for each strategic firm
- **Advantage:**
 - ✓ use of any available production cost model (PCM)
- **Drawback:**
 - ✓ market equilibrium constraints depend on system marginal price (SMP), not directly obtained from a PCM

Production cost model with market equilibrium constraints

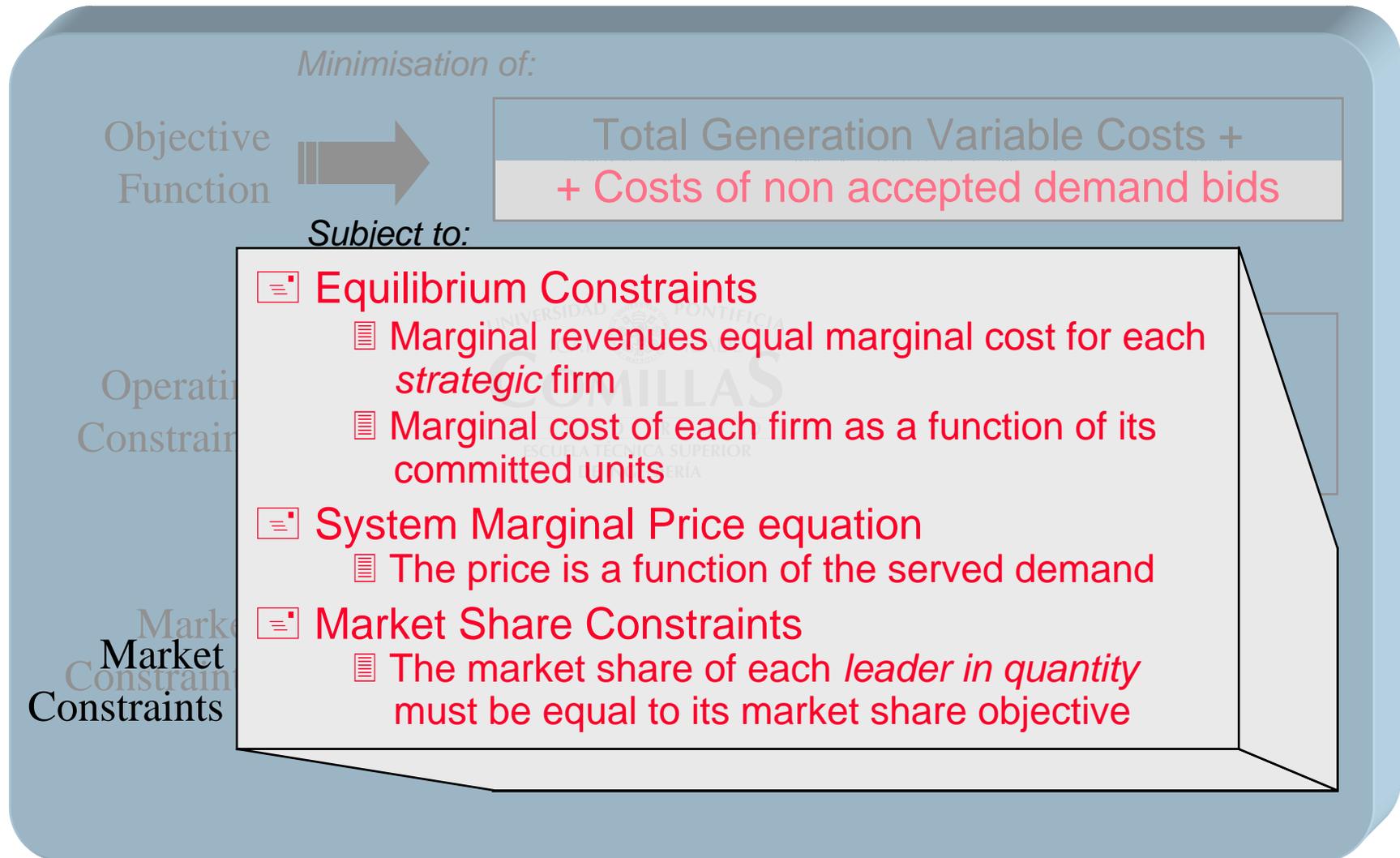


Utility function

- Market equilibrium obtained by maximizing consumer's and producer's surplus



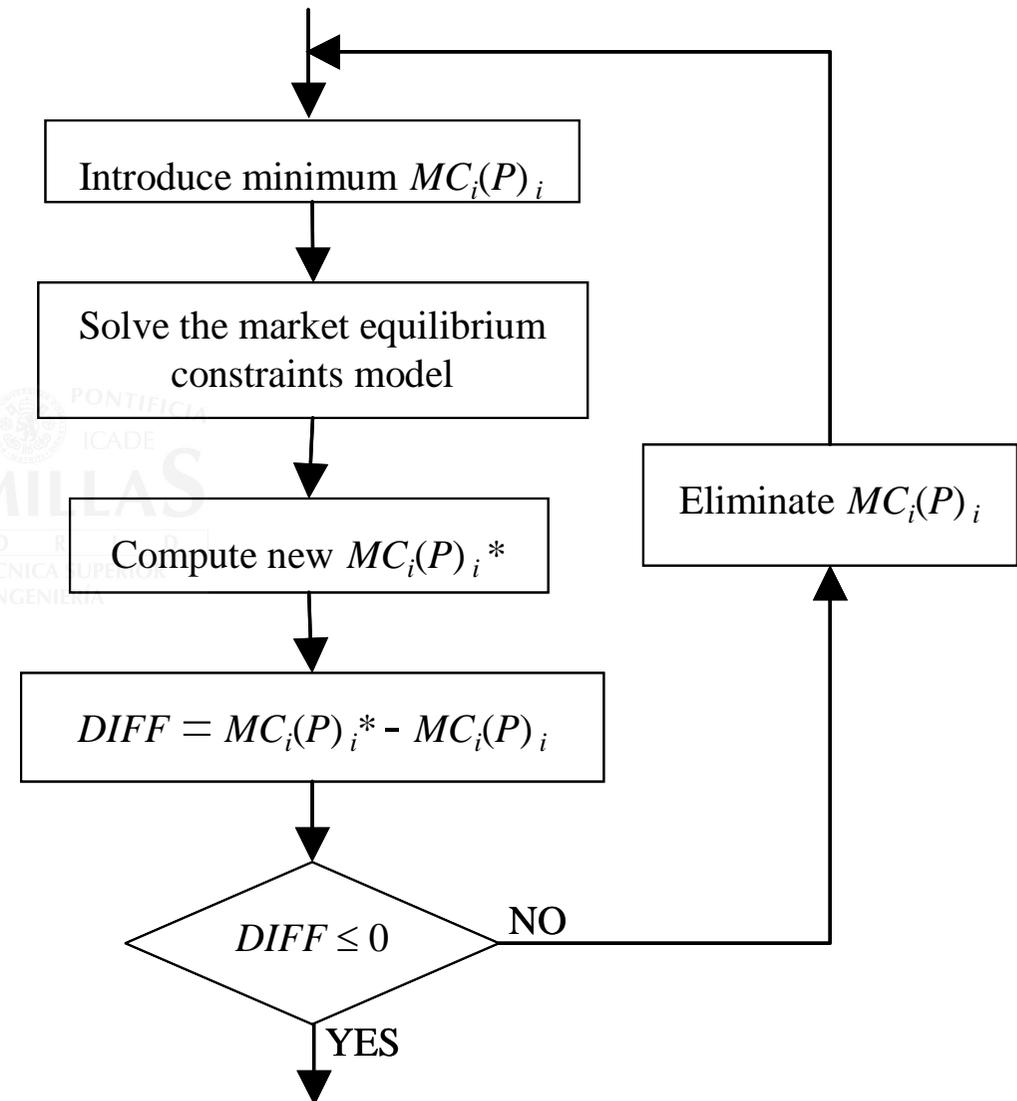
Market equilibrium constraints



Iterative computation of system marginal price (SMP)

- Marginal cost (MC) of each firm i not directly calculated by the PCM due to discrete commitment decisions
- P_i output of firm i

$$P_i \leq \frac{SMP - MC_i(P_i)}{-\text{demand slope}}$$



Conclusions

- Market equilibrium under an oligopoly based on the Cournot conjecture, represented by a production cost model plus market equilibrium constraints
- Iterative algorithm to calculate the system marginal cost
- Iterative algorithm to refine hydro scheduling for strategic firms
- Resulting MIP problem solved by robust, efficient and reliable solvers



Contenido

1. Modelo de coste de explotación a medio plazo con restricciones de equilibrio
2. Modelo de equilibrio de mercado mediante el problema complementario
3. Modelo de generación de ofertas mediante técnicas de descomposición
4. Análisis dinámico de estrategias de ofertas
5. Modelo de coordinación hidrotérmica a medio plazo mediante descomposición anidada estocástica de Benders para variables enteras
6. Gestión energética óptima de un consumidor industrial de energía térmica y eléctrica

Modelo de equilibrio de mercado mediante el problema complementario

➤ Publicaciones

- ✓ M. Ventosa, A. Baíllo, A. Ramos, M. Rivier *Electricity Market Modeling Trends* Energy Policy Vol. 33 (7) pp. 897-913 May 2005
- ✓ A. García-Alcalde, M. Ventosa, M. Rivier, A. Ramos, G. Relaño *Fitting Electricity Market Models. A Conjectural Variations Approach* 14th Power Systems Computation Conference (PSCC '02) Seville, Spain June 2002
- ✓ M. Rivier, M. Ventosa, A. Ramos, F. Martínez-Córcoles and A. Chiarri *A Generation Operation Planning Model in Deregulated Electricity Markets based on the Complementarity Problem* in book *Complementarity: Applications, Algorithms and Extensions* Kluwer Academic Publishers. Dordrecht, The Netherlands. pp. 273-295. 2001
- ✓ A. García-Alcalde, M. Ventosa, M. Rivier, A. Ramos *Gestión del riesgo frente a la incertidumbre en las aportaciones hidráulicas en un mercado eléctrico mediante el problema complementario* VII Jornadas Hispano-Lusas de Ingeniería Eléctrica Vol III, pp. 39-45 Madrid, España Julio 2001

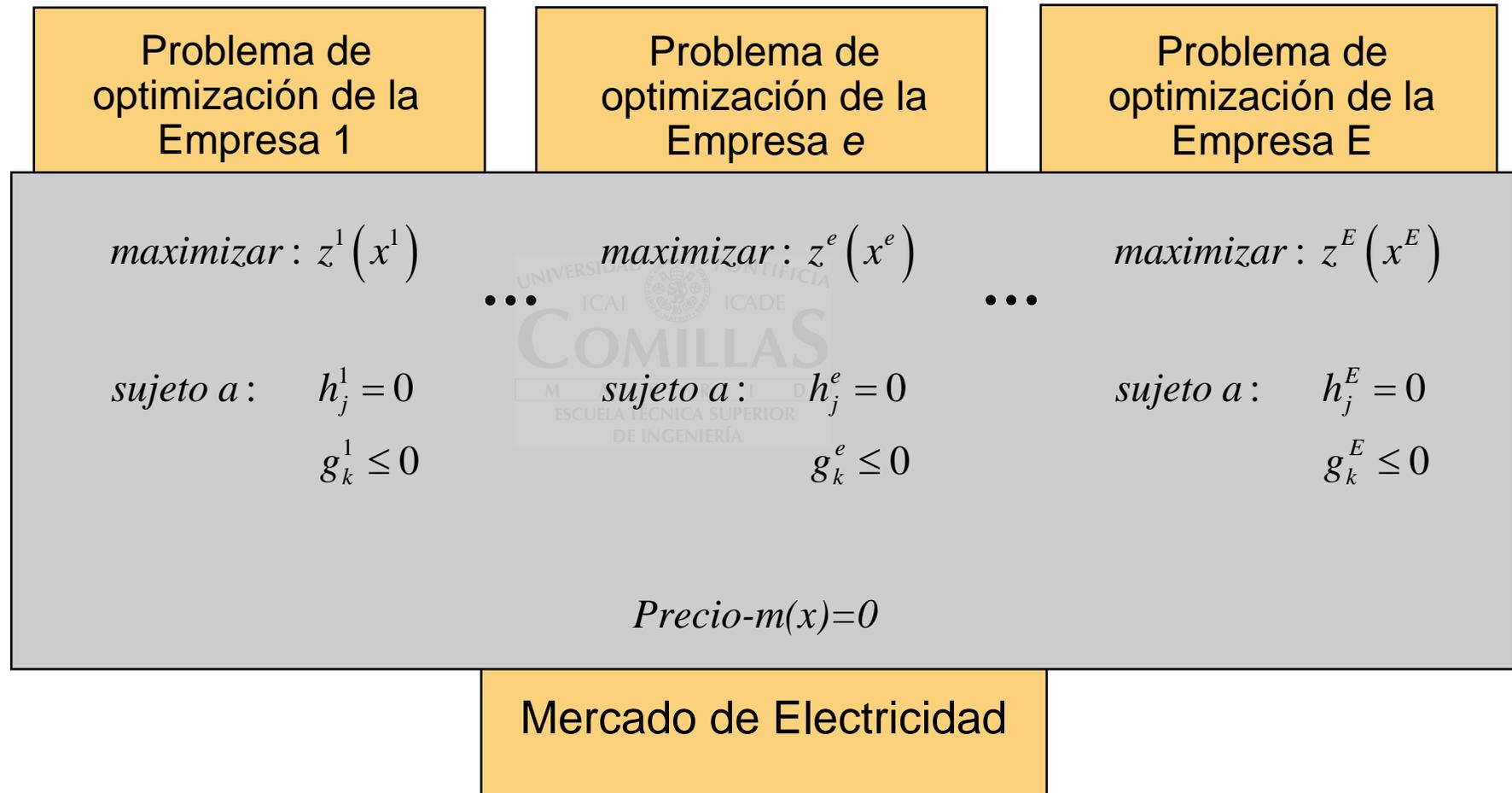
➤ Tesis doctoral

- ✓ *Modelado de la explotación de la generación en mercados eléctricos liberalizados mediante el problema complementario* Mariano Ventosa. Universidad Pontificia Comillas ETSI-ICAI. Enero 2001

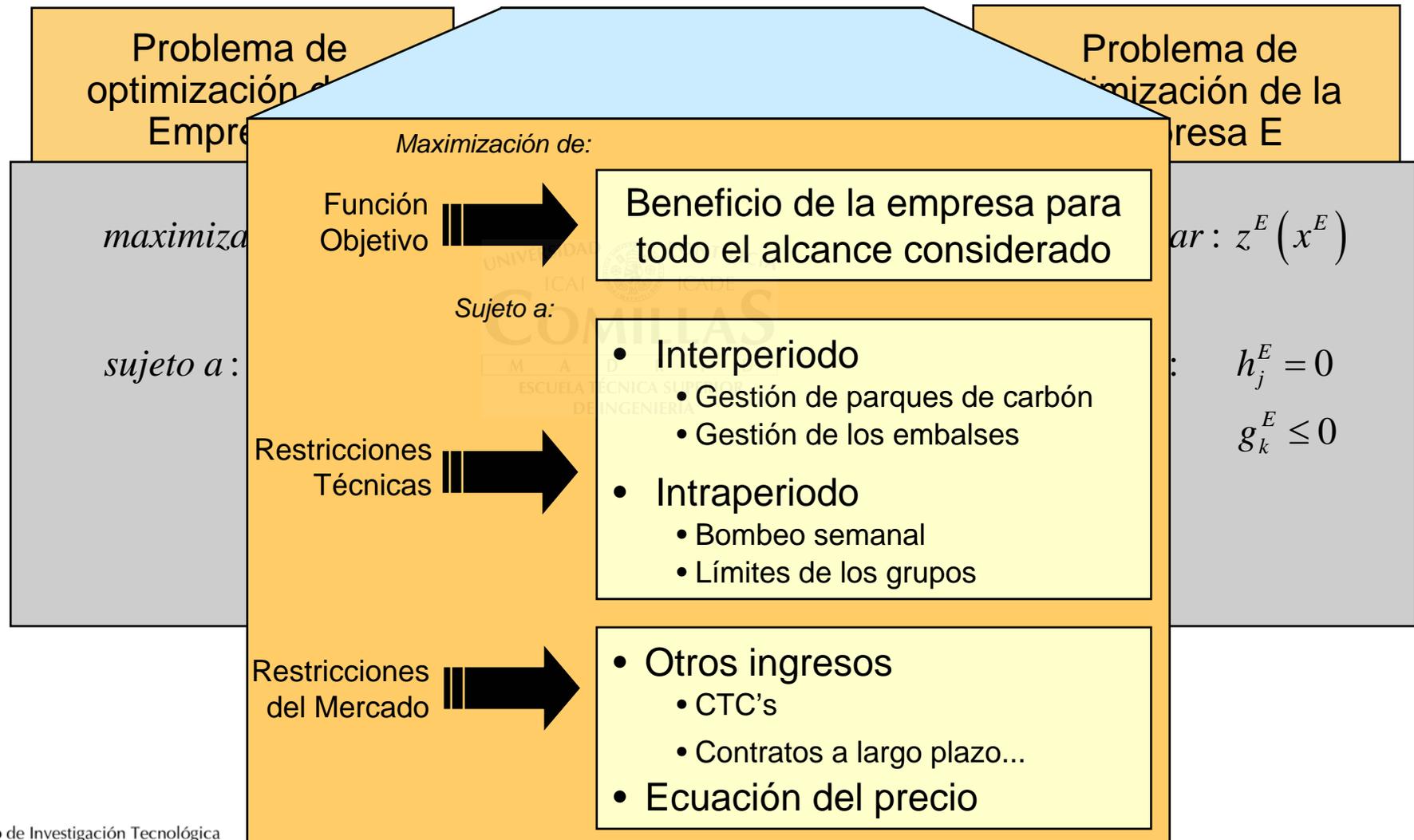
¿Por qué un modelo de equilibrio basado en el Problema Complementario?

- Modelar el mercado eléctrico como un Problema Complementario permite
 - ✓ Una representación **flexible** del mercado y de la explotación a **medio y largo plazo**
 - Modelado de los grandes **movimientos de energía**
 - ✓ La solución obtenida es **técnicamente factible**
 - ✓ El equilibrio del mercado **existe y es único**
- Métodos de **solución** de Problemas Complementarios
 - ✓ **Tamaño realista: 10.000** variables
 - ✓ Aunque menor potencia de cálculo que con optimización lineal

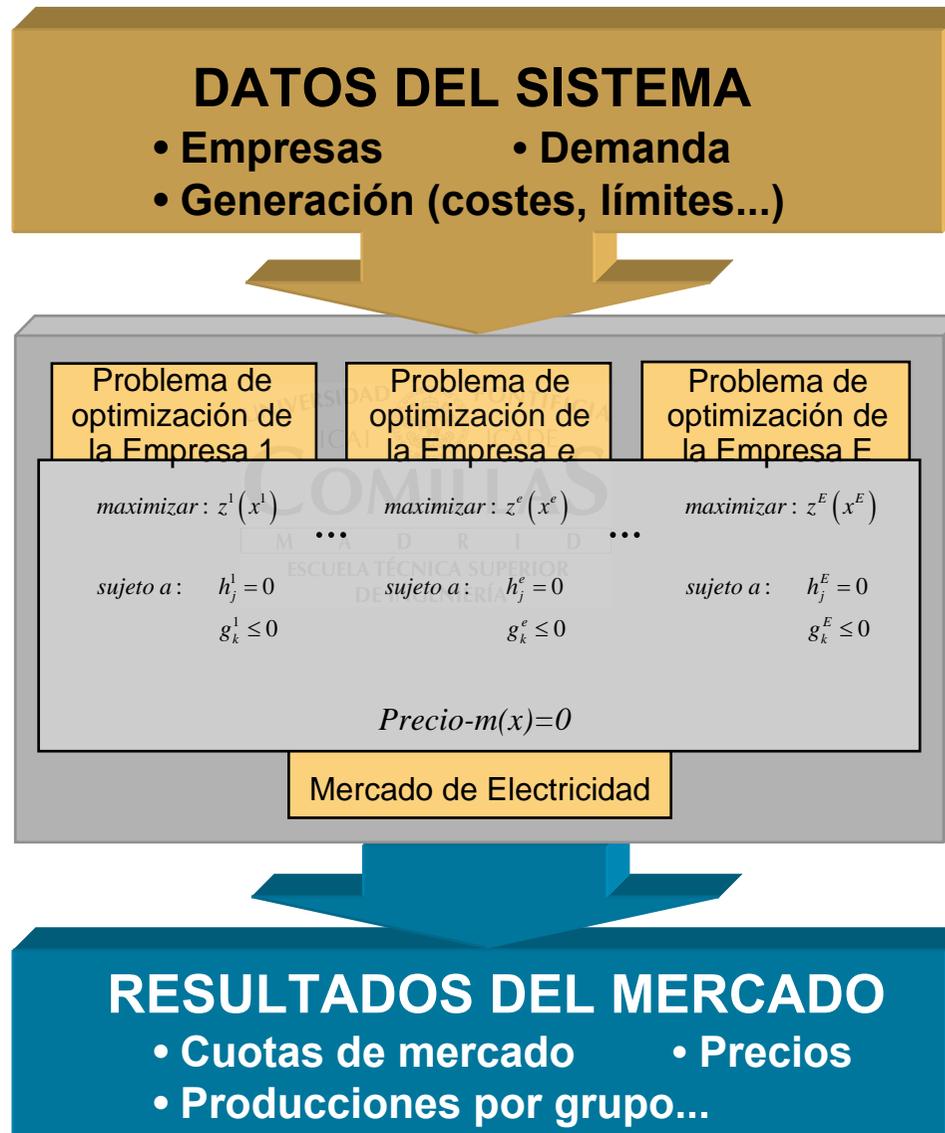
Planteamiento del problema



Planteamiento del problema: El problema de cada empresa



Planteamiento del problema: Utilización del modelo



Dificultades prácticas

- El planteamiento anterior es, desde el punto de vista **teórico**, indiscutible
- Sin embargo, **no existe** ni optimizador ni algoritmo **capaz** de **resolver** dicho problema matemático:
 - ✓ Varios problemas de optimización acoplados por la variable precio
- Hay que buscar un problema equivalente
 - ✓ Con la misma solución para sus variables
 - ✓ **Resoluble** numéricamente
- Existen varias alternativas
 - ✓ **Problema Complementario** [Ventosa, Hobbs]
 - ✓ Problema cuadrático equivalente [Barquín, Hobbs]
 - ✓ Inecuaciones variacionales [Smeers]

Condiciones de Optimalidad del Problema de cada empresa

maximizar $z^e(x)$

sujeto a:

$$h_j^e(x) = 0 \quad \perp \lambda_j^e$$

$$g_k^e(x) \leq 0 \quad \perp \mu_k^e$$

Función de Lagrange

$$\mathcal{L}^e(x, \lambda, \mu) = z^e + \sum_j \lambda_j^e \cdot h_j^e + \sum_k \mu_k^e \cdot g_k^e$$

**Condiciones de
optimalidad KKT**

$$\begin{aligned} \nabla_x \mathcal{L}^e(x, \lambda, \mu) &= \frac{\partial \mathcal{L}^e}{\partial x^e} = 0 \\ \nabla_\lambda \mathcal{L}^e(x, \lambda, \mu) &= \frac{\partial \mathcal{L}^e}{\partial \lambda_j^e} = h_j^e = 0 \\ \mu_k^e \cdot g_k^e &= 0 \quad g_k^e \leq 0 \quad \mu_k^e \leq 0 \end{aligned}$$

Problema complementario mixto

- Unión de un **sistema de ecuaciones** con un **problema complementario**
- Generalización del problema complementario

Sistema de ecuaciones



$$\nabla_x \mathcal{L}^e(x, \lambda, \mu) = \frac{\partial \mathcal{L}^e}{\partial x^e} = 0$$
$$\nabla_\lambda \mathcal{L}^e(x, \lambda, \mu) = \frac{\partial \mathcal{L}^e}{\partial \lambda_j^e} = h_j^e = 0$$

$$\mu_k^e \cdot g_k^e = 0 \quad g_k^e \leq 0 \quad \mu_k^e \leq 0$$

**Problema
Complementario**



UNIVERSIDAD PONTIFICIA
ICAI ICADE
COMILLAS
M A D R I D
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR
DE INGENIERÍA

Problema Complementario equivalente

Condiciones de optimalidad de la Empresa 1

Condiciones de optimalidad de la Empresa e

Condiciones de optimalidad de la Empresa E

$$\nabla_x \mathcal{L}^1(x, \lambda, \mu) = \frac{\partial \mathcal{L}^1}{\partial x^1} = 0$$

$$\nabla_x \mathcal{L}^e(x, \lambda, \mu) = \frac{\partial \mathcal{L}^e}{\partial x^e} = 0$$

$$\nabla_x \mathcal{L}^E(x, \lambda, \mu) = \frac{\partial \mathcal{L}^E}{\partial x^E} = 0$$

$$\nabla_\lambda \mathcal{L}^1(x, \lambda, \mu) = \frac{\partial \mathcal{L}^1}{\partial \lambda_j^1} = h_j^1 = 0$$

$$\nabla_\lambda \mathcal{L}^e(x, \lambda, \mu) = \frac{\partial \mathcal{L}^e}{\partial \lambda_j^e} = h_j^e = 0$$

$$\nabla_\lambda \mathcal{L}^E(x, \lambda, \mu) = \frac{\partial \mathcal{L}^E}{\partial \lambda_j^E} = h_j^E = 0$$

$$\mu_k^1 \cdot g_k^1 = 0 \quad g_k^1 \leq 0 \quad \mu_k^1 \leq 0$$

$$\mu_k^e \cdot g_k^e = 0 \quad g_k^e \leq 0 \quad \mu_k^e \leq 0$$

$$\mu_k^E \cdot g_k^E = 0 \quad g_k^E \leq 0 \quad \mu_k^E \leq 0$$

Precio-m(y)=0

Mercado de Electricidad

Comparison of a production cost model with MEC with a MCP approach

➤ Advantages of PCM with MEC approach

- ✓ Realistic modeling of the electric system (e.g., binary unit commitment variables)
- ✓ Robust and efficient solution methods (e.g., Branch and bound for MIP)
- ✓ Constraints must be linear
- ✓ Convergence not guaranteed but obtained in practice

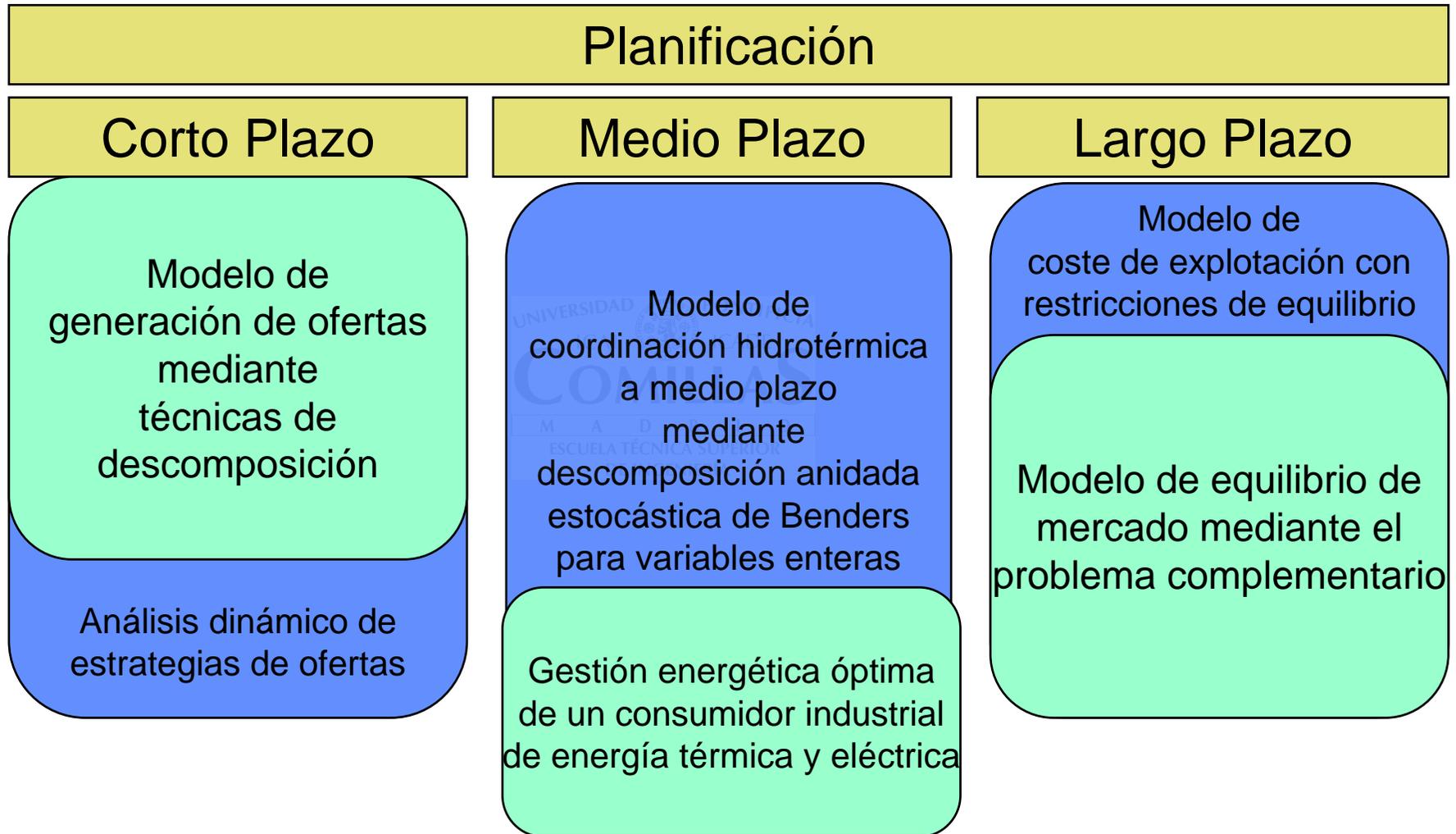
➤ Advantages of MCP approach

- ✓ Compact problem formulation
- ✓ Only continuous variables
- ✓ Possibility of introducing nonlinear constraints
- ✓ Optimality guaranteed and solution uniqueness with linear constraints
- ✓ Slow solution method and depending of the initial value

Contenido

1. Modelo de coste de explotación a medio plazo con restricciones de equilibrio
2. Modelo de equilibrio de mercado mediante el problema complementario
3. Modelo de generación de ofertas mediante técnicas de descomposición
4. Análisis dinámico de estrategias de ofertas
5. Modelo de coordinación hidrotérmica a medio plazo mediante descomposición anidada estocástica de Benders para variables enteras
6. Gestión energética óptima de un consumidor industrial de energía térmica y eléctrica

Líneas de trabajo



Modelo de generación de ofertas mediante técnicas de descomposición

➤ Publicaciones

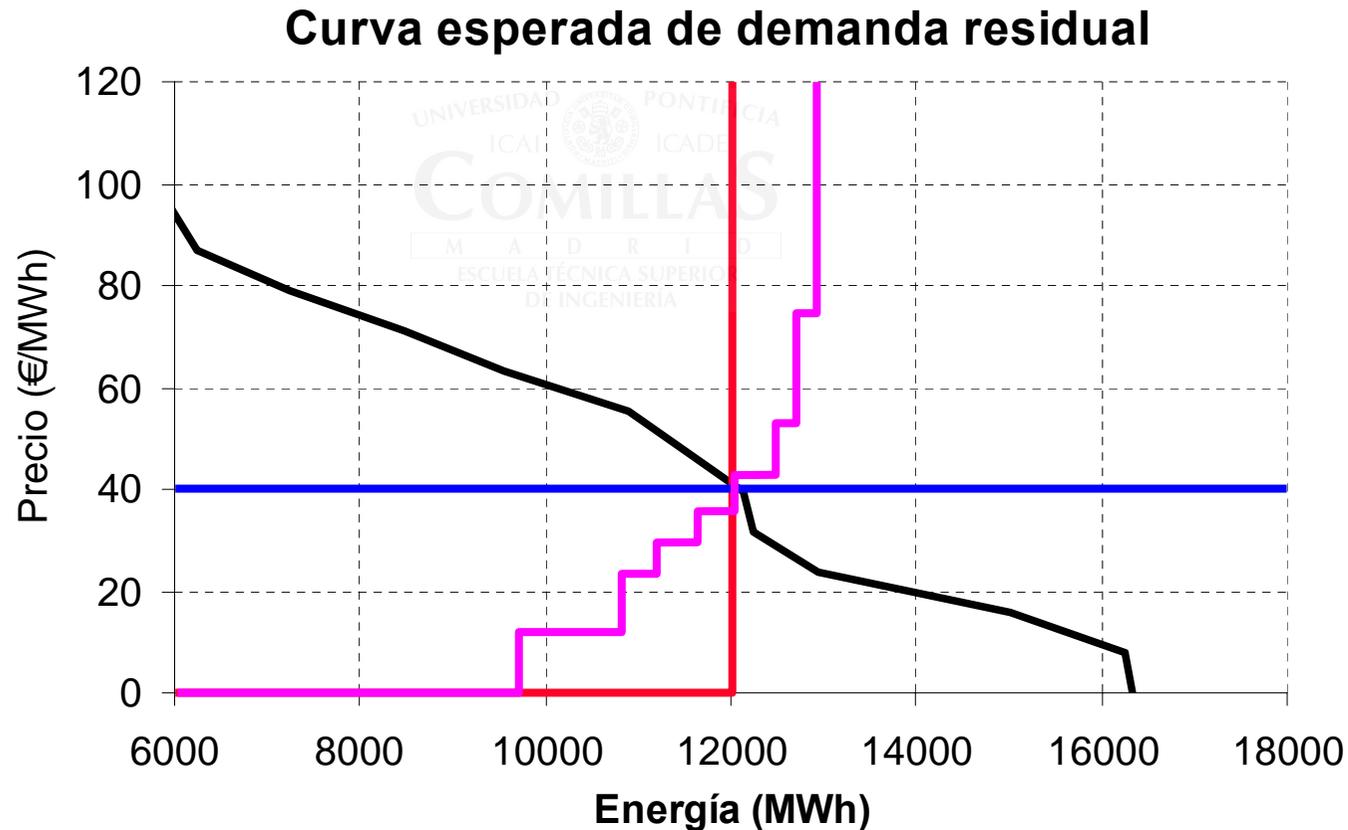
- ✓ A. Baíllo, M. Ventosa, M. Rivier, A. Ramos *Optimal Offering Strategies for Generation Companies Operating in Electricity Spot Markets* IEEE Transactions on Power Systems Vol. 19 (2) pp. 745-753 May 2004
- ✓ A. Baíllo, M. Ventosa, M. Rivier, A. Ramos, G. Relación *Bidding in a Day-Ahead Electricity Market: A Comparison of Decomposition Techniques* 14th Power Systems Computation Conference (PSCC '02) Seville, Spain June 2002
- ✓ A. Baíllo, M. Ventosa, A. Ramos, M. Rivier, A. Canseco *Strategic unit commitment for generation companies in deregulated electricity markets* in book *The Next Generation of Electric Power Unit Commitment Models* Kluwer Academic Publishers Boston, MA, USA pp. 227-248 2001

➤ Tesis doctoral

- ✓ *Optimización de la explotación y de la preparación de ofertas de una empresa de generación de energía eléctrica para mercados de corto plazo* Álvaro Baíllo. Universidad Pontificia Comillas ETSI-ICAI. Septiembre 2002

Modelado avanzado de la incertidumbre en el corto plazo: enfoque multietapa

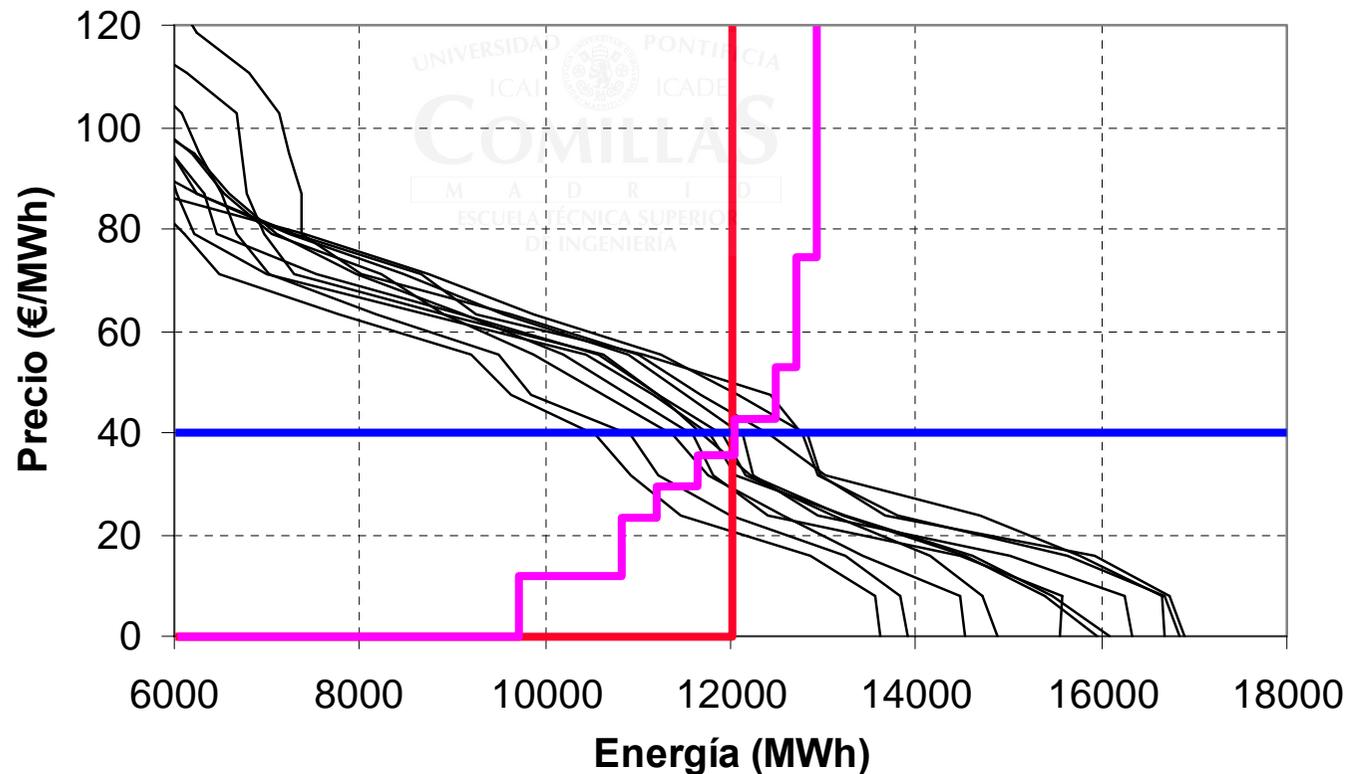
- La empresa de generación **no sabe** la curva de **demanda residual** con la que se va a enfrentar en cada subasta horaria:



Modelado avanzado de la incertidumbre en el corto plazo: enfoque multietapa

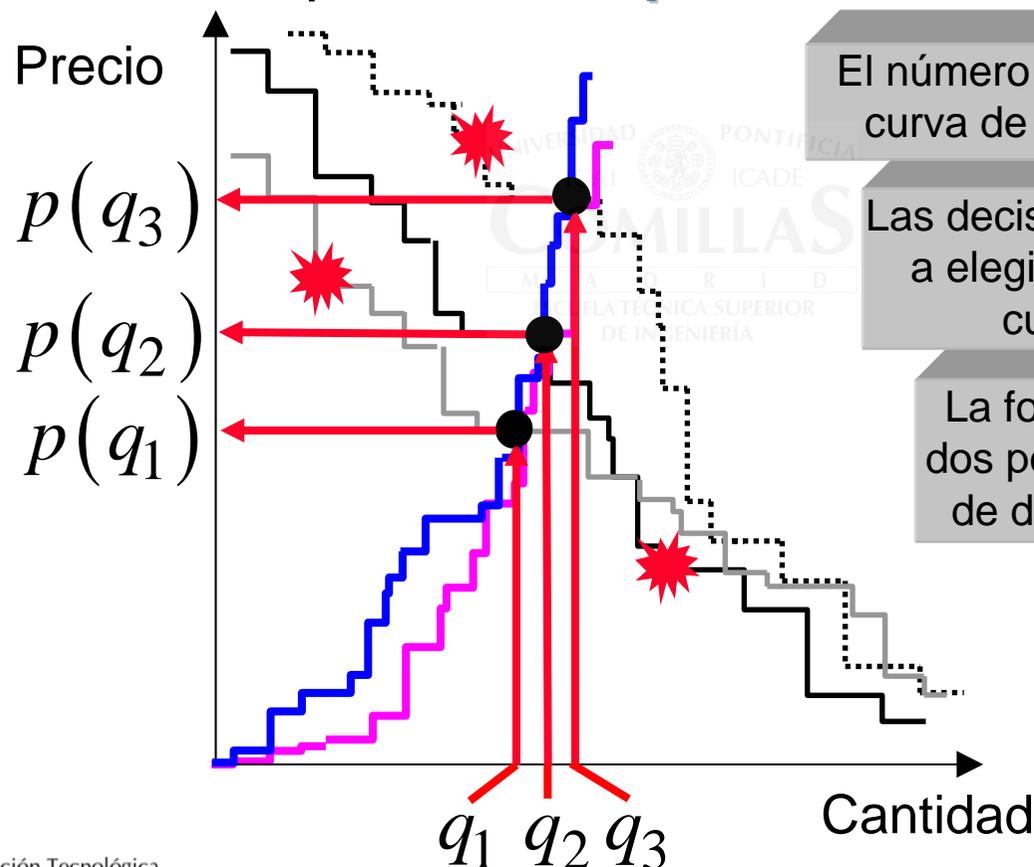
- El **reconocimiento explícito** de la **incertidumbre** justifica la importancia del problema de elaboración de ofertas:

Posibles curvas de demanda residual



Modelado avanzado de la incertidumbre en el corto plazo: enfoque multietapa

- **Hipótesis:** La **distribución de probabilidad** de la curva de **demanda residual** de cada subasta del mercado spot tiene **soporte finito**:



El número de posibles realizaciones de la curva de demanda residual es limitado

Las decisiones de la empresa se reducen a elegir un nivel de ventas para cada curva de demanda residual

La forma de la curva de oferta entre dos posibles realizaciones de la curva de demanda residual es irrelevante

Las cantidades decididas por la empresa deben constituir una curva de oferta creciente.

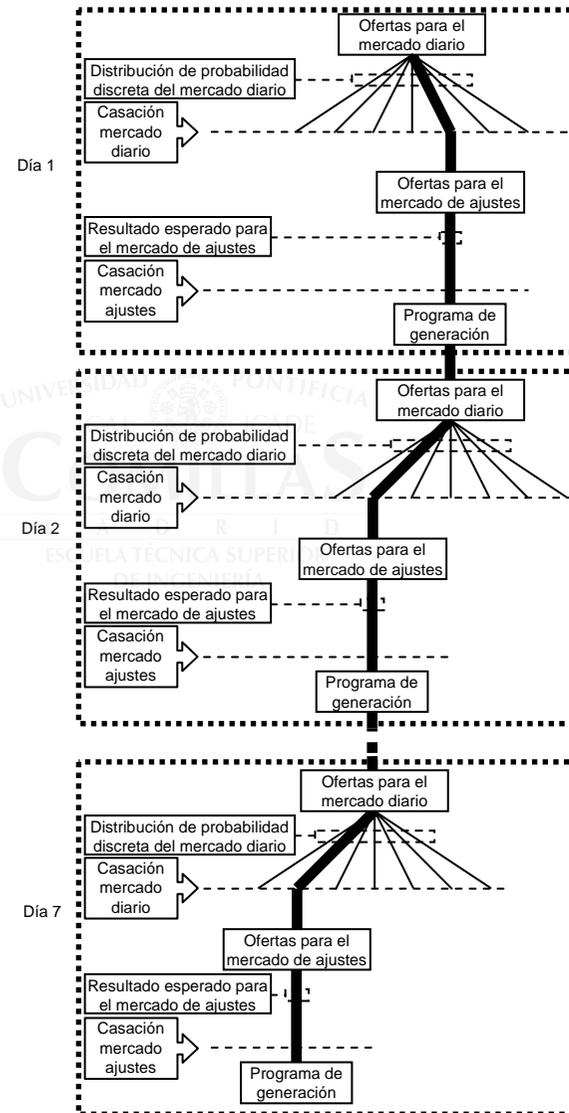
Estrategias de solución del problema

- **Solución en dos fases:**
 - ✓ Planificación semanal de la producción ante incertidumbre en el mercado diario (*unit commitment* estocástico).
 - ✓ Preparación de ofertas óptimas para un mecanismo de mercado concreto ante incertidumbre.
- **Análisis de la estructura** de estos problemas.
- **Dos posibles técnicas de descomposición:**
 - ✓ Benders.
 - ✓ Relajación lagrangiana.

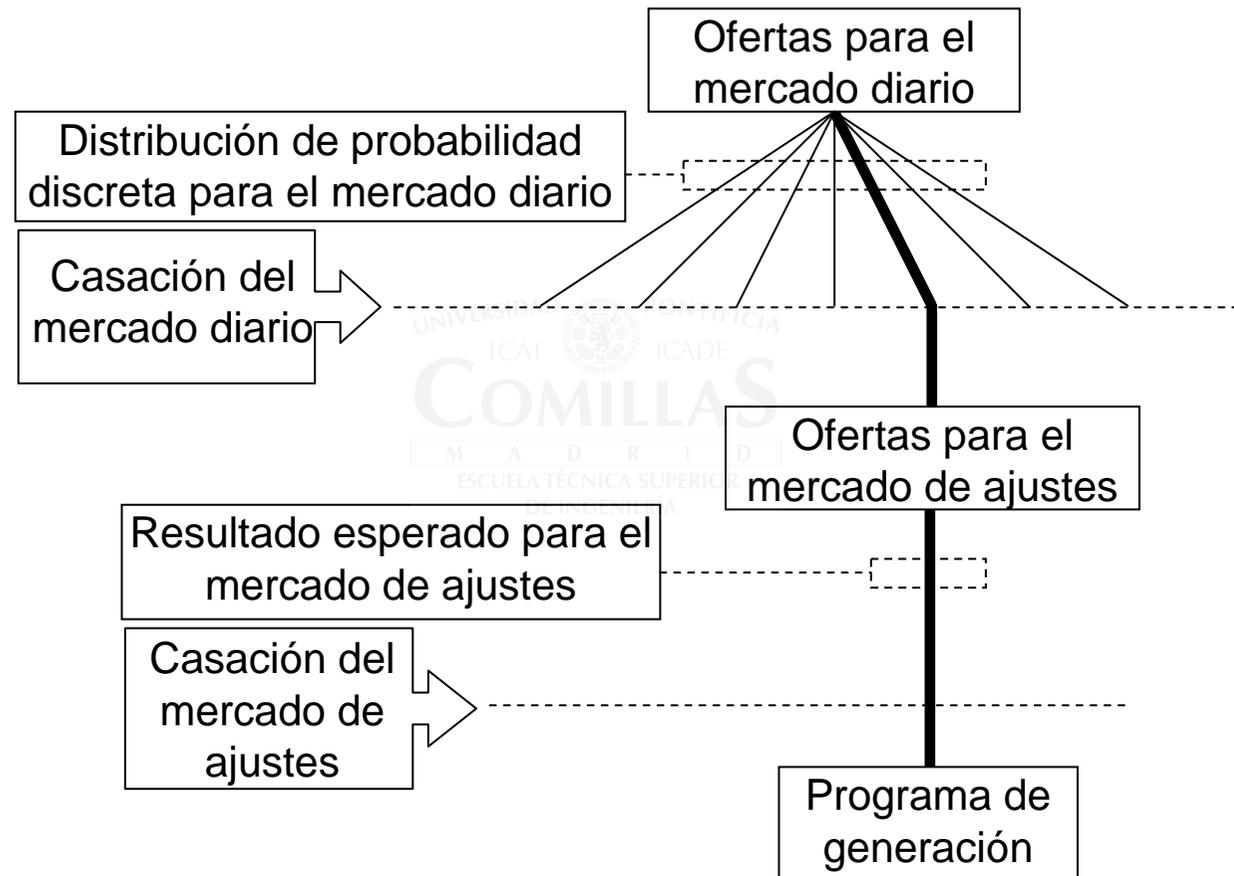
Primer tipo de problema: problema semanal estocástico multietapa

- Hay **decisiones de corto plazo** que deben tomarse con un horizonte temporal de **una semana**:
 - ✓ Planificación de arranques y paradas: ***unit commitment***.
 - ✓ Reparto diario de los recursos hidráulicos disponibles para la semana: ***hydrothermal coordination***.
- Este problema semanal puede verse como una **secuencia de programas estocásticos bietapa**, uno para cada día de la semana.

Primer tipo de problema: problema semanal estocástico multietapa



Segundo tipo de problema: problema bietapa de preparación de ofertas



Segundo tipo de problema: caracterización

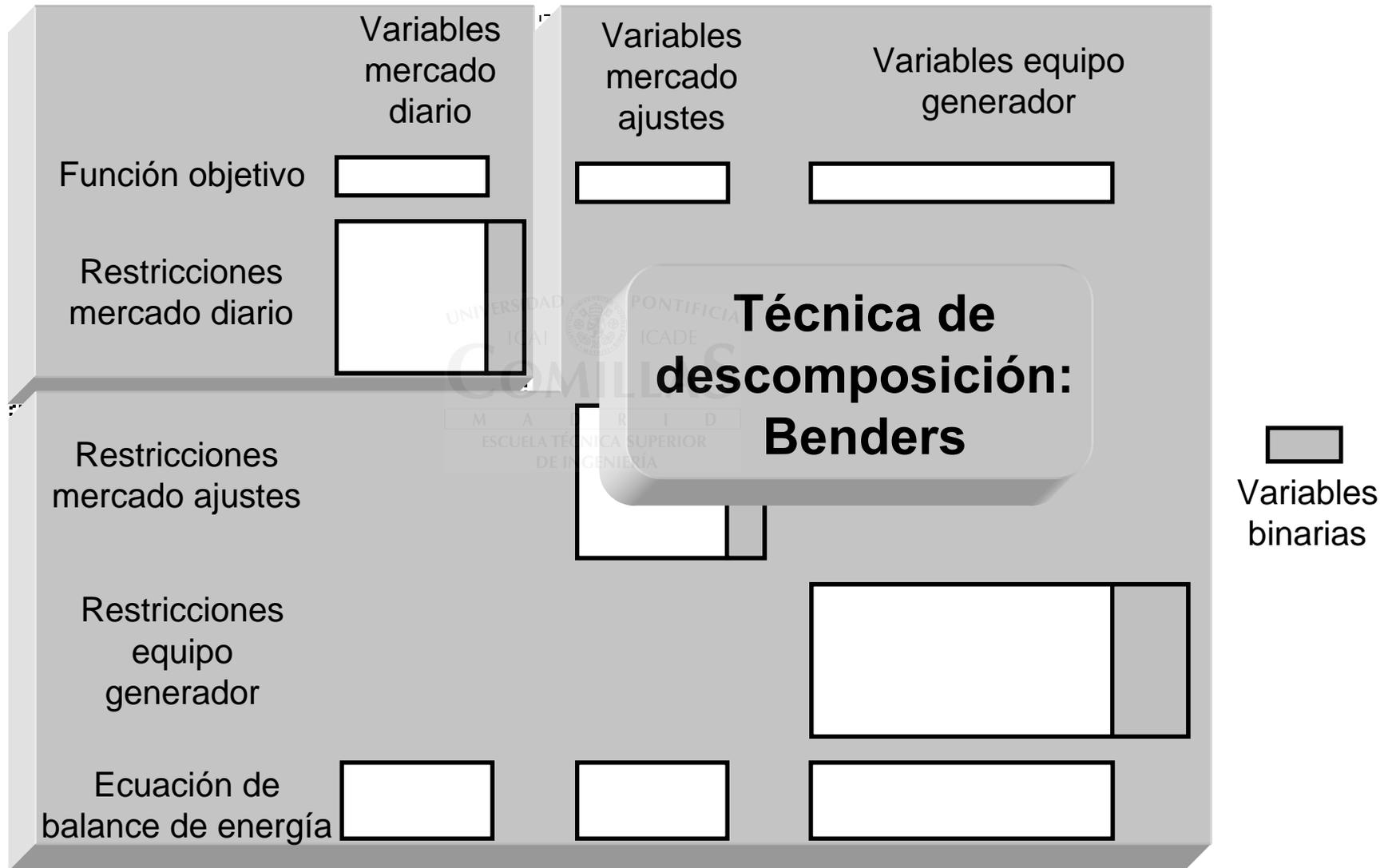
- Problema MIP.
- **Tamaño para un caso de estudio real** con once escenarios de mercado spot:

MODEL STATISTICS

BLOCKS OF EQUATIONS	22	SINGLE EQUATIONS	99758
BLOCKS OF VARIABLES	14	SINGLE VARIABLES	91043
NON ZERO ELEMENTS	414855	DISCRETE VARIABLES	10529

- CPLEX no puede resolver este problema.
- Es necesario el uso de una **técnica de descomposición** para resolver este problema.
 - ✓ La elección de la técnica más adecuada depende de la estructura del problema.

Análisis de la estructura del problema: Énfasis en la estructura bietapa



Técnicas de resolución:

Benders

- Benders es la **opción natural** cuando el problema tiene una **estructura bietapa**.
- La descomposición de Benders se basa en dividir el problema original en **dos partes**:
 - ✓ **Problema maestro**:
 - Contiene las decisiones de la primera etapa.
 - Decisiones previas al conocimiento de un futuro incierto
 - Puede ser cualquier tipo de problema: No lineal, no convexo.
 - ✓ **Subproblema**:
 - Contiene las decisiones de la segunda etapa.
 - Decisiones para adaptarse al resultado de ese futuro incierto (decisiones de recurso)
 - Debe ser convexo: **no puede tener variables binarias**.

Técnicas de resolución: Benders



Técnicas de resolución:

Benders

➤ Ventajas:

- ✓ Descomposición **más natural** para la estructura bietapa del problema de construcción de ofertas:
 - **Maestro** correspondiente al mecanismo de mercado actual (e.g. mercado diario): modelado detallado.
 - **Subproblema** correspondiente al siguiente mecanismo de mercado y al programa de generación.
- ✓ **Solución final factible**, incluso si el proceso se detiene antes de tiempo.

➤ Inconvenientes:

- ✓ El **subproblema debe ser convexo**: no puede incluir variables binarias:
 - Modelado del mercado de ajustes simplificado.
 - No se pueden decidir arranques y paradas de grupos.

Contenido

1. Modelo de coste de explotación a medio plazo con restricciones de equilibrio
2. Modelo de equilibrio de mercado mediante el problema complementario
3. Modelo de generación de ofertas mediante técnicas de descomposición
- 4. Análisis dinámico de estrategias de ofertas**
5. Modelo de coordinación hidrotérmica a medio plazo mediante descomposición anidada estocástica de Benders para variables enteras
6. Gestión energética óptima de un consumidor industrial de energía térmica y eléctrica

Análisis dinámico de estrategias de ofertas

➤ Publicaciones

- ✓ A. Ramos, A. Baíllo, S. López, M. Rivier, M. Ventosa *Analysis of short-term dynamic behavior of an electricity market* Internal Report IIT-02-057A September 2001



Models for competitive markets

- **Static equilibrium models**
 - ✓ Static representation of competition among companies
 - ✓ All the agents play the game in a **single act**
 - ✓ Resort to **optimization**
- **Dynamic simulation models**
 - ✓ The order of the bids is important
 - ✓ The game is played by the agents in **multiple acts** (many stages)
 - ✓ Resort to **simulation**

Static equilibrium models

- Two main approaches to model static market equilibrium:
 - ✓ Cournot (firms compete only in quantities)
 - ✓ Supply function equilibrium (in quantities and prices)
- A great number of models are based on Cournot equilibrium
- Time scope
 - ✓ Long-term: expansion planning
 - ✓ Medium-term: hydrothermal coordination, contracting decisions, risk management
 - ✓ Short-term: strategic unit commitment



Short-term dynamic decision process

- Main objectives of the model:
 - ✓ How the guidelines of medium-term models are internalized into daily offers sent to a day-ahead single-node electricity market. How to reach medium-term objectives by means of short-term decisions
 - ✓ How to analyze severe market perturbations
- At the same time:
 - ✓ How to analyze the consequences of different decisions
 - ✓ Review past results to gain understanding of the market

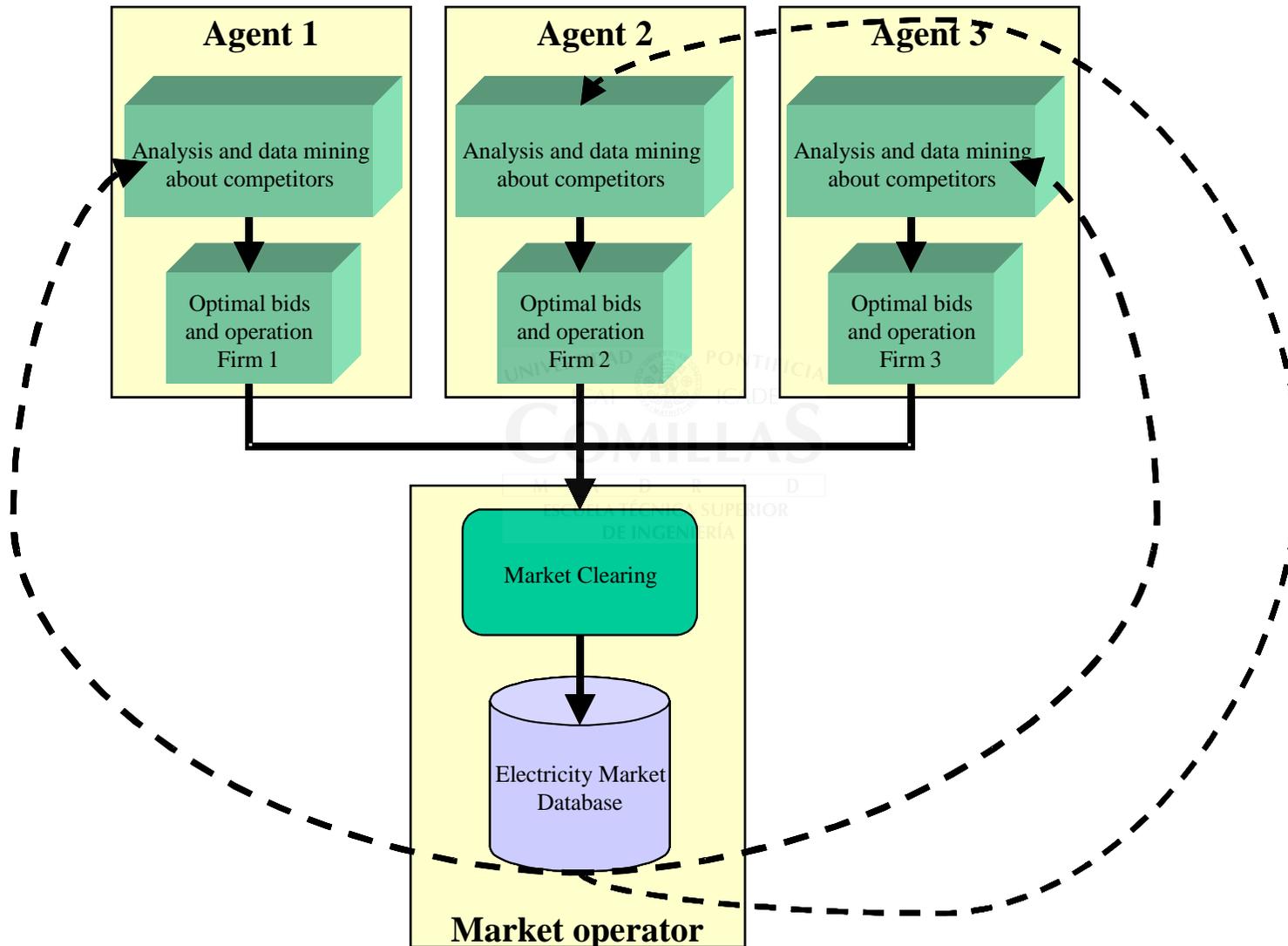
Simulation approach

- Represent, analyze, and provide **quantitative results of the electricity market game**
- Main characteristics of simulation:
 - ✓ Capability of modeling complex systems
 - ✓ Ability to incorporate the dynamic aspects
- **Drawback:** more complex to understand, much more effort to validate
- **Helpful training tool for traders,** better understanding of the electricity market in the short-term

System characterization

- Each generation agent
 1. Analysis and **data mining** about the competitors' behavior
 2. Determination of **optimal bids** and expected operation
- **Market operator**
 1. Receives the daily offers from the agents
 2. Clears the market according to the specified rules
 3. Incorporates the information to a database accessible for any agent. Publishes the daily results
- **System operator** is currently **ignored**

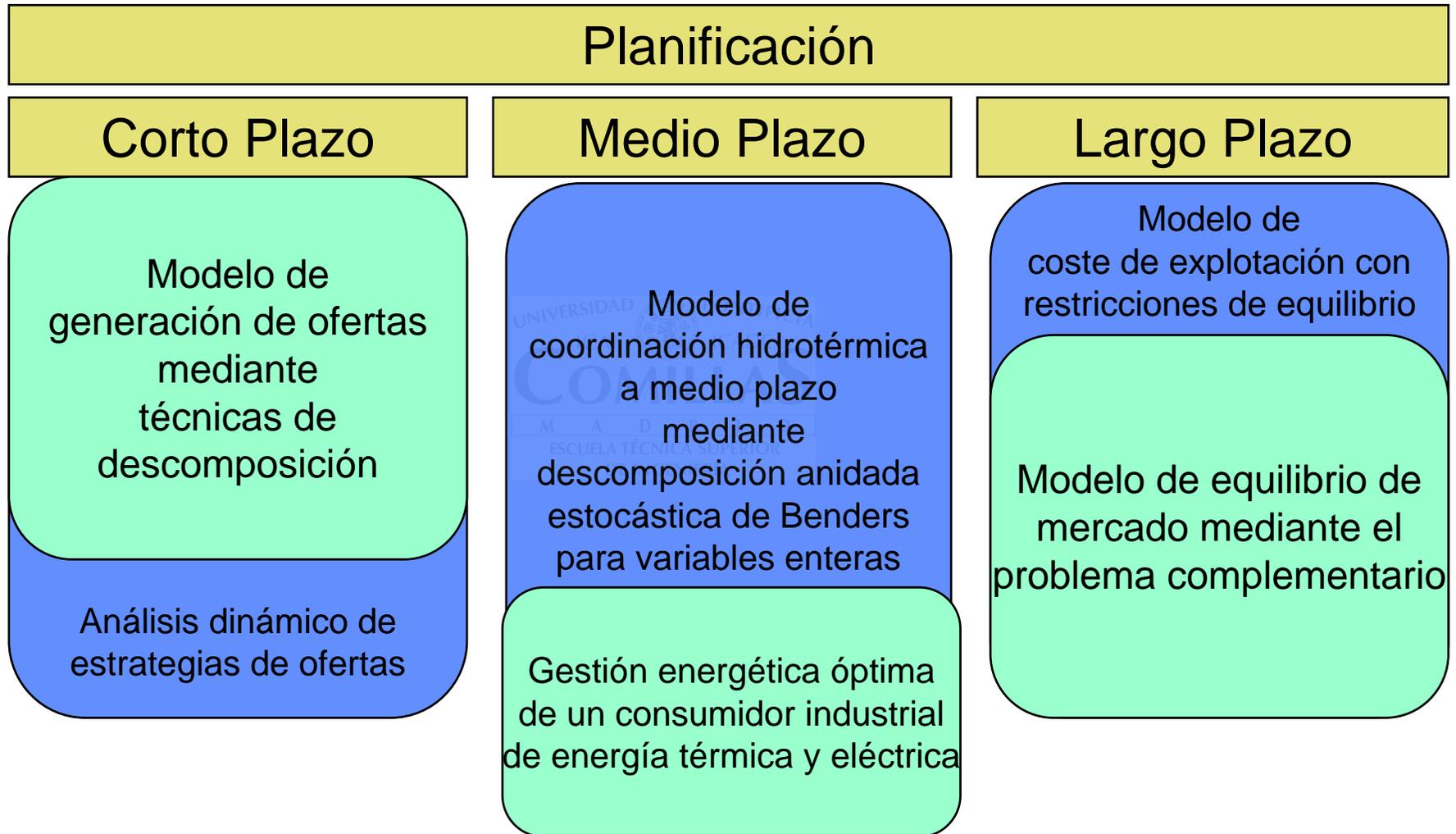
Electricity market simulator structure



Contenido

1. Modelo de coste de explotación a medio plazo con restricciones de equilibrio
2. Modelo de equilibrio de mercado mediante el problema complementario
3. Modelo de generación de ofertas mediante técnicas de descomposición
4. Análisis dinámico de estrategias de ofertas
5. Modelo de coordinación hidrotérmica a medio plazo mediante descomposición anidada estocástica de Benders para variables enteras
6. Gestión energética óptima de un consumidor industrial de energía térmica y eléctrica

Líneas de trabajo



Modelo de coordinación hidrotérmica a medio plazo

➤ Publicaciones

- ✓ S. Cerisola, A. Ramos *Benders Decomposition for Mixed-Integer Hydrothermal Problems by Lagrangean Relaxation* 14th Power Systems Computation Conference (PSCC '02) Seville, Spain June 2002
- ✓ S. Cerisola, A. Ramos *Node Aggregation in Stochastic Nested Benders Decomposition Applied to Hydrothermal Coordination* 6th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems Madeira, Portugal September 2000
- ✓ B. Vitoriano, S. Cerisola, A. Ramos *Generating Scenario Trees for Hydro Inflows* 6th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems (PMAPS) Madeira, Portugal September 2000

➤ Tesis doctoral

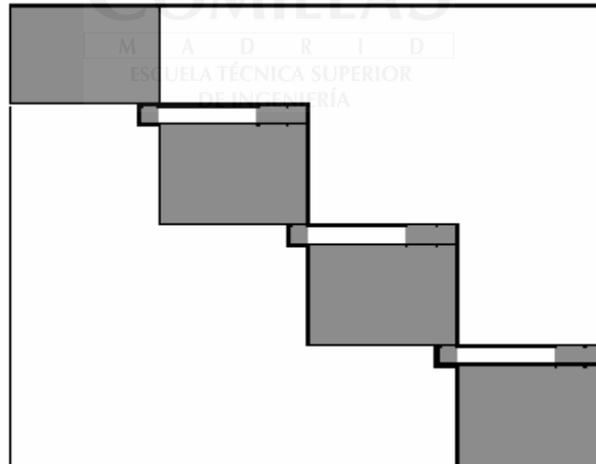
- ✓ *Benders decomposition for mixed integer problems. Application to a medium term hydrothermal coordination problem* Santiago

Cerisola. Universidad Pontificia Comillas ETSI-ICAI. Abril 2004



Hydrothermal coordination problem

- Minimization of total operation cost subject to demand supply.
- Multiperiod problems usually present a staircase matrix structure suitable to be solved via a Benders decomposition algorithm.



Mixed integer variables

- Appear when modeling nonlinear curves (e.g., PQH curves) as a piecewise functions
- Mixed integer variables that represent commitment, start up and shut down of thermal units



Contenido

1. Modelo de coste de explotación a medio plazo con restricciones de equilibrio
2. Modelo de equilibrio de mercado mediante el problema complementario
3. Modelo de generación de ofertas mediante técnicas de descomposición
4. Análisis dinámico de estrategias de ofertas
5. Modelo de coordinación hidrotérmica a medio plazo mediante descomposición anidada estocástica de Benders para variables enteras
6. Gestión energética óptima de un consumidor industrial de energía térmica y eléctrica

Gestión energética óptima de un consumidor industrial de energía térmica y eléctrica

➤ Publicaciones

- ✓ E. Gómez-Villalva y A. Ramos *Herramienta de apoyo a la decisión de contratación en mercados minoristas de energía* Anales de Mecánica y Electricidad Vol. LXXXI (VI) pp. 46-51. Noviembre - Diciembre 2004
- ✓ E. Gómez-Villalva and A. Ramos *Optimal Energy Management of an Industrial Consumer in Liberalized Markets* IEEE Transactions on Power Systems Vol. 18 (2) pp. 716-723 May 2003

➤ Tesis doctoral

- ✓ *Gestión energética óptima a medio plazo de un consumidor industrial de energía térmica y eléctrica en mercados liberalizados* Emilio Gómez-Villalva. Universidad Pontificia Comillas ETSI-ICAI. Julio 2004

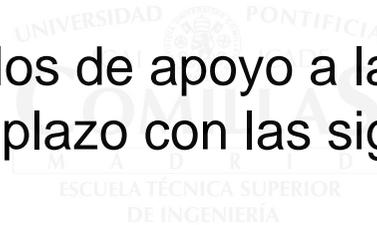
MOTIVACION Y OBJETO

➤ Motivación:

- ✓ Necesidad de nuevas herramientas matemáticas para consumidores industriales en mercados liberalizados

➤ Objeto:

- ✓ Desarrollo de modelos de apoyo a la **decisión en contratación y operación** a medio plazo con las siguientes características:
 - Herramienta completa: módulos de optimización y generación de precios
 - Modelos sencillos de parametrizar
 - Datos fácilmente accesibles



PLANTEAMIENTO DETERMINISTA

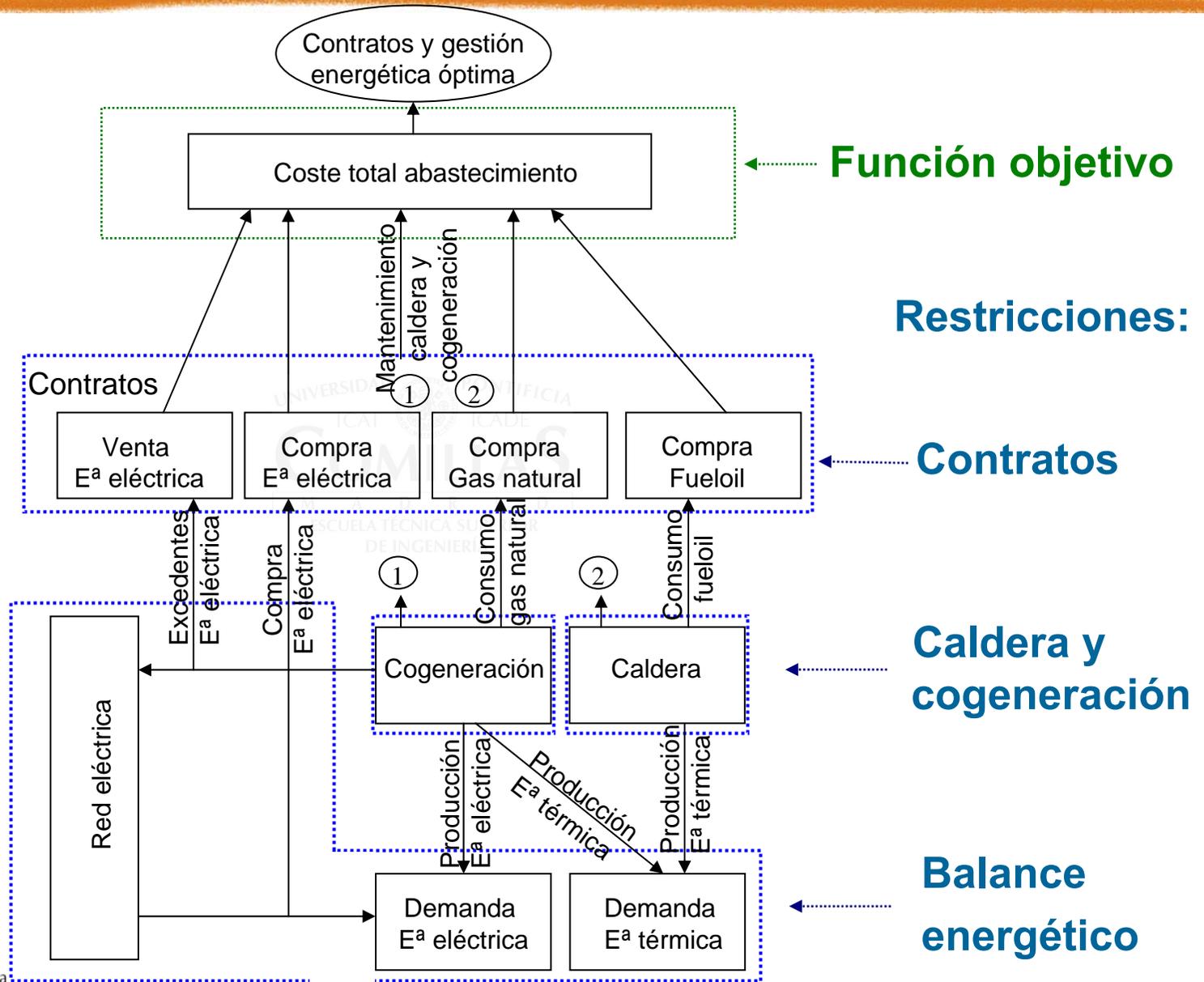
Características generales

- **Gestión energética a medio plazo**
 - ✓ Minimización del coste de abastecimiento
- **Alcance anual**
- **Consumidor industrial con demanda térmica y eléctrica**
 - ✓ Cogeneración
 - ✓ Caldera
- **Decisiones**
 - ✓ Contratos de suministro energético
 - ✓ Operación de la caldera y la cogeneración



PLANTEAMIENTO DETERMINISTA

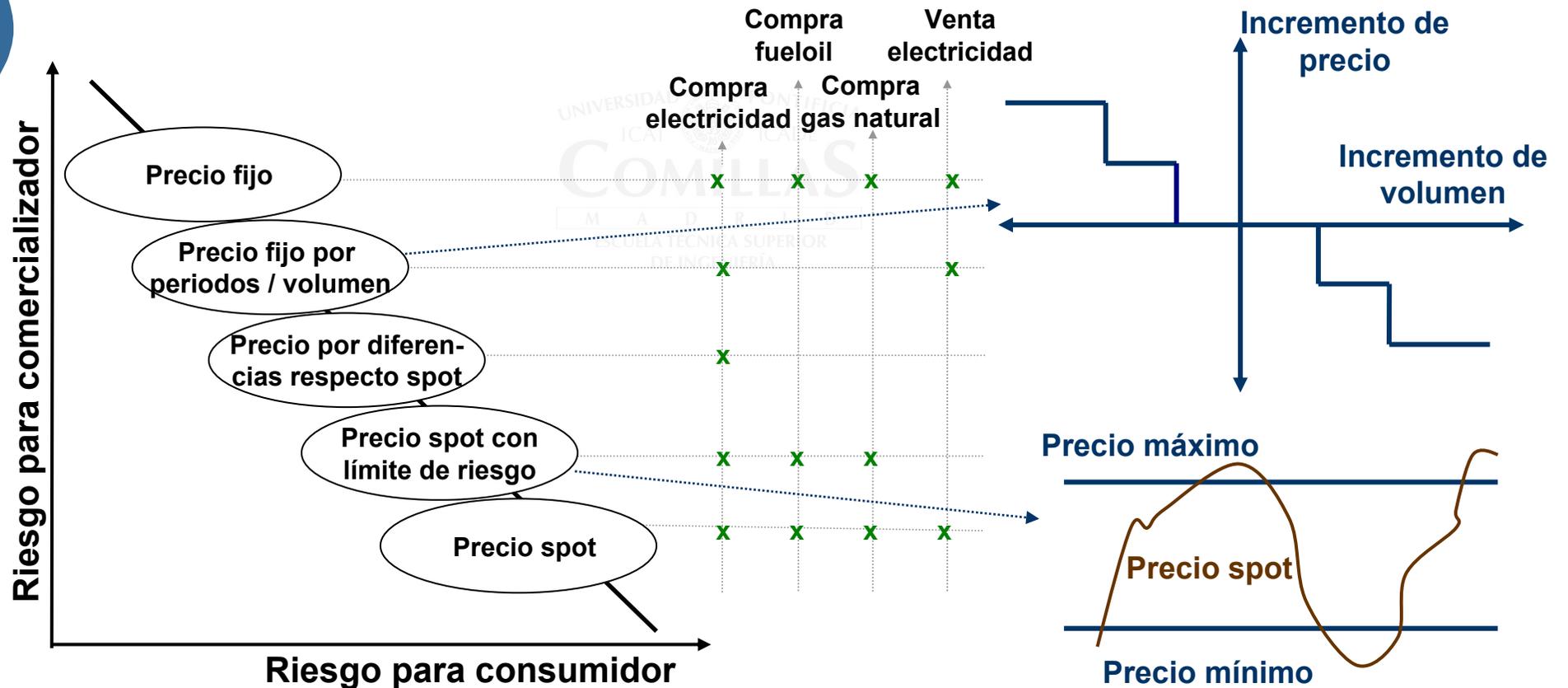
Características generales



PLANTEAMIENTO DETERMINISTA

Contratos

- Decisiones principales del modelo
- Se escoge un contrato anual de cada tipo
- Contratos modelados con diferente aversión al riesgo



PLANTEAMIENTO ESTOCÁSTICO

Características generales

- **Planteamiento determinista**
 - ✓ Limitado para el tratamiento de la incertidumbre
- **Optimización estocástica**
 - ✓ Permite tomar decisiones considerando explícitamente la incertidumbre de los parámetros
- **Fuentes de riesgo para consumidores industriales**
 - ✓ **Riesgo de precios**
 - ✓ Riesgo de cantidad: fallo del sistema o fluctuaciones de la demanda
 - ✓ Otros riesgos: crédito y regulatorios

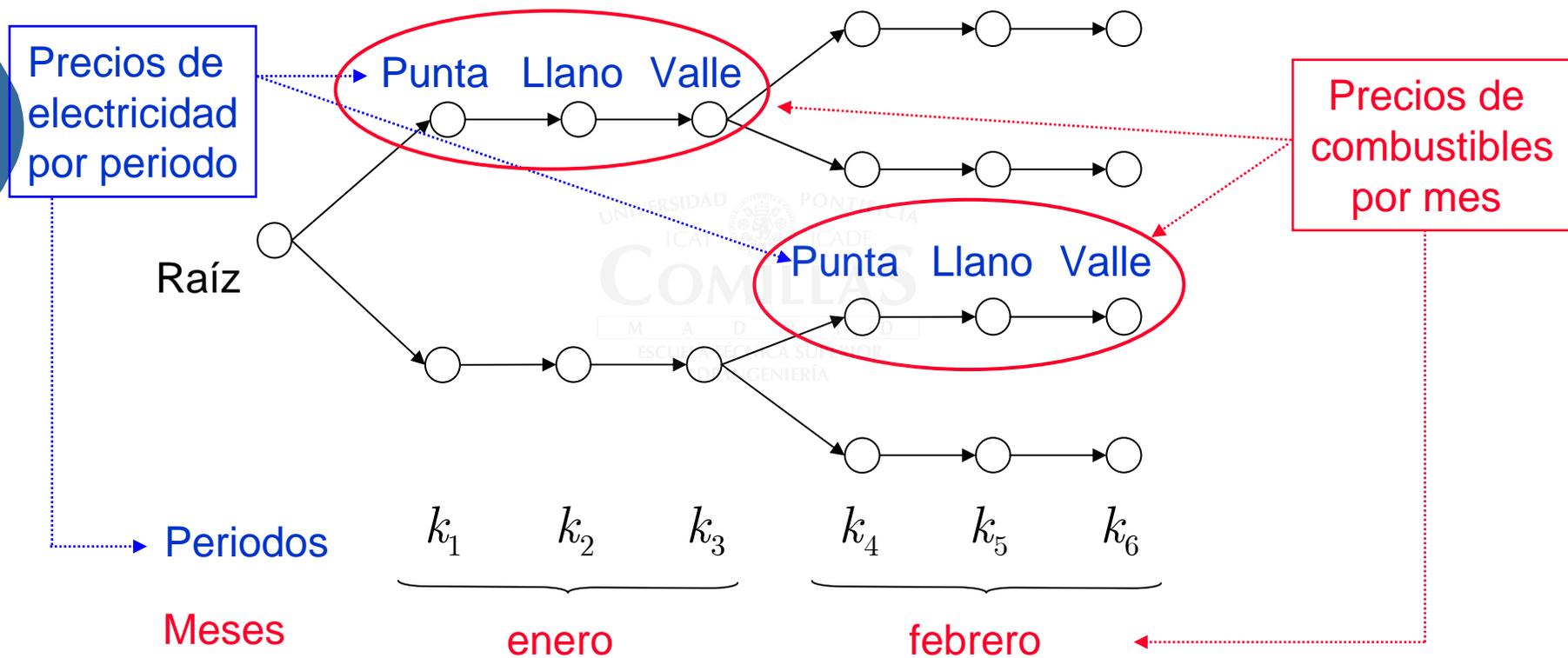


Parámetros estocásticos: precios de compraventa de electricidad, gas natural y fueloil

PLANTEAMIENTO ESTOCÁSTICO

Tratamiento de la incertidumbre

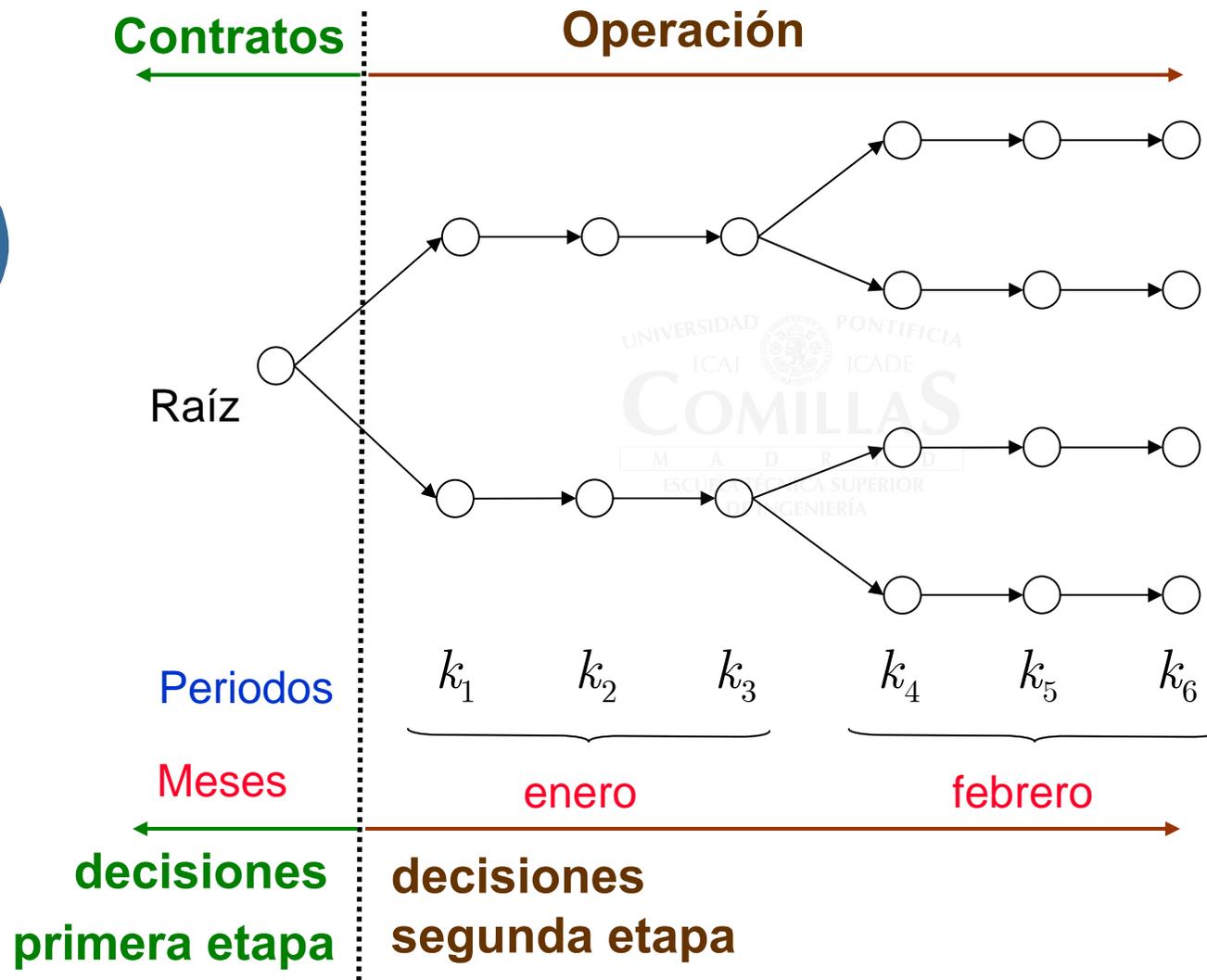
- Representación discreta de la incertidumbre:
árbol de escenarios



PLANTEAMIENTO ESTOCÁSTICO

Tratamiento de la incertidumbre

➤ Modelo bietapa



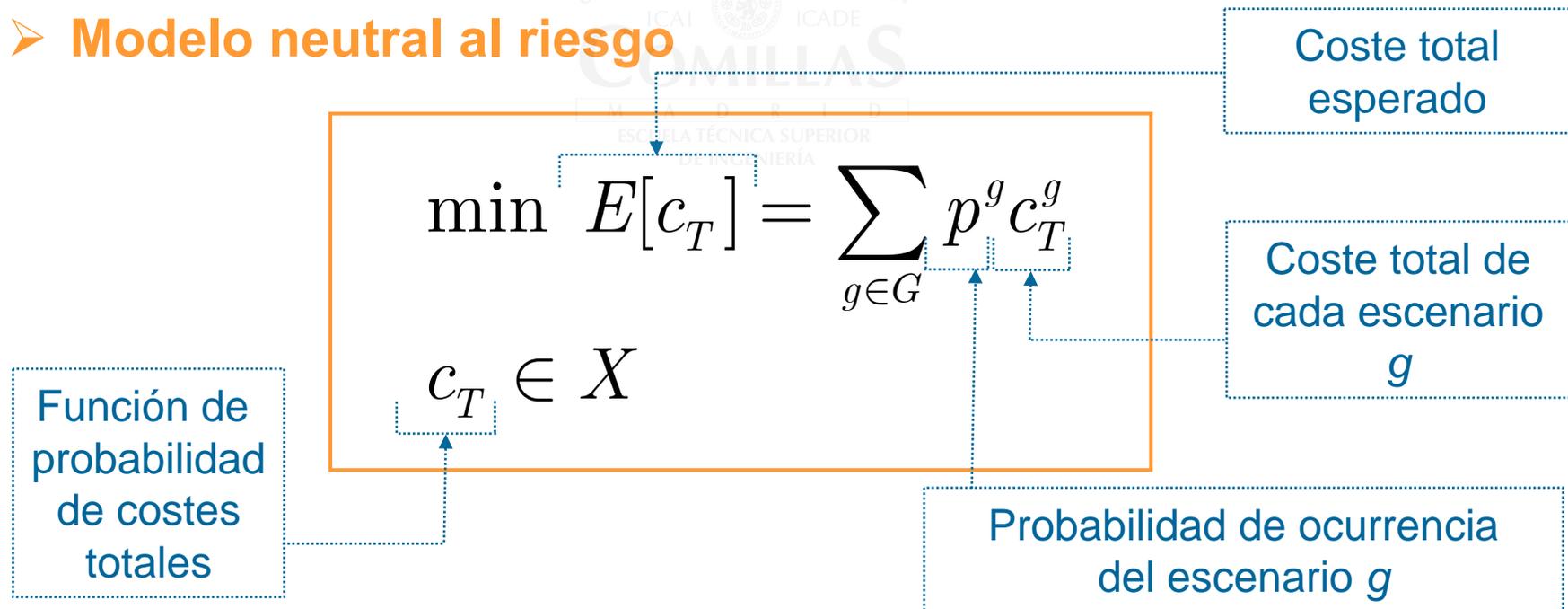
PLANTEAMIENTO ESTOCÁSTICO

Modelo neutral al riesgo

- **Coste total abastecimiento** c_T^g **para cada escenario** g :
 - ✓ Coste contratos para cada escenario
 - ✓ Coste mantenimiento de la instalación para cada escenario
- **Restricciones** X :

caldera, cogeneración, balance energía y contratos

- **Modelo neutral al riesgo**



PLANTEAMIENTO ESTOCÁSTICO

Modelo neutral al riesgo

➤ Inconveniente

- No realiza gestión del riesgo

➤ Solución

- Programación estocástica multiobjetivo

- ✓ Compromiso riesgo – coste esperado

- ✓ Frontera eficiente: conjunto de soluciones óptimas

➤ Definición de riesgo para consumidores industriales

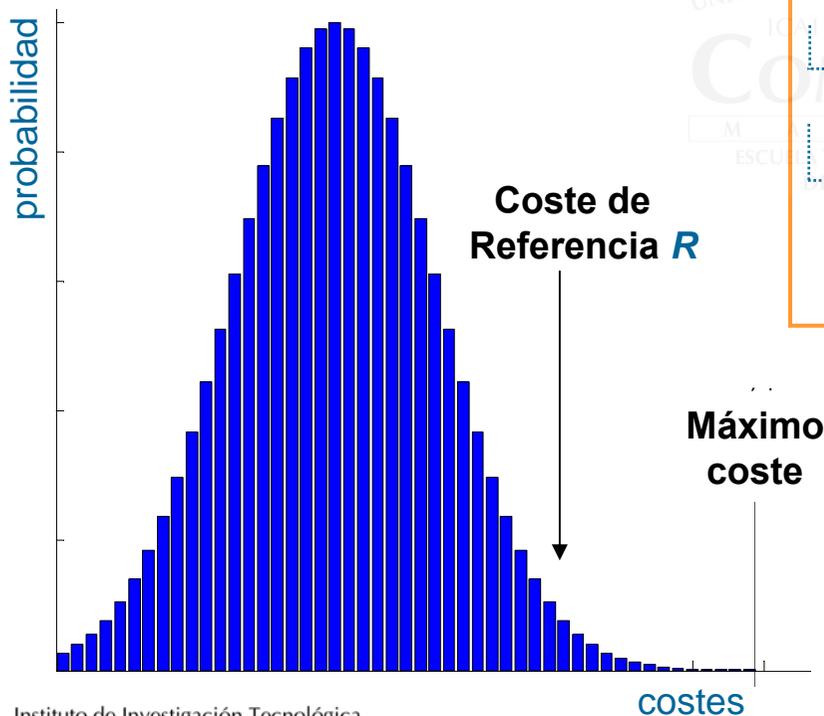
- POSIBILIDAD DE INCURRIR EN COSTES ALTOS

PLANTEAMIENTO ESTOCÁSTICO

Modelo coste de referencia

➤ Medida de riesgo

Penalización lineal de costes por encima de un coste de referencia R



$$\min \sum_{g \in G} p^g c_T^{g+}$$

$$c_T \in X$$

$$E[c_T] \leq S$$

$$c_T^{g+} \geq c_T^g - R \quad \forall g \in G$$

$$c_T^{g+} \geq 0 \quad \forall g \in G$$

Medida de riesgo

Coste esperado limitado por parámetro de aversión al riesgo S

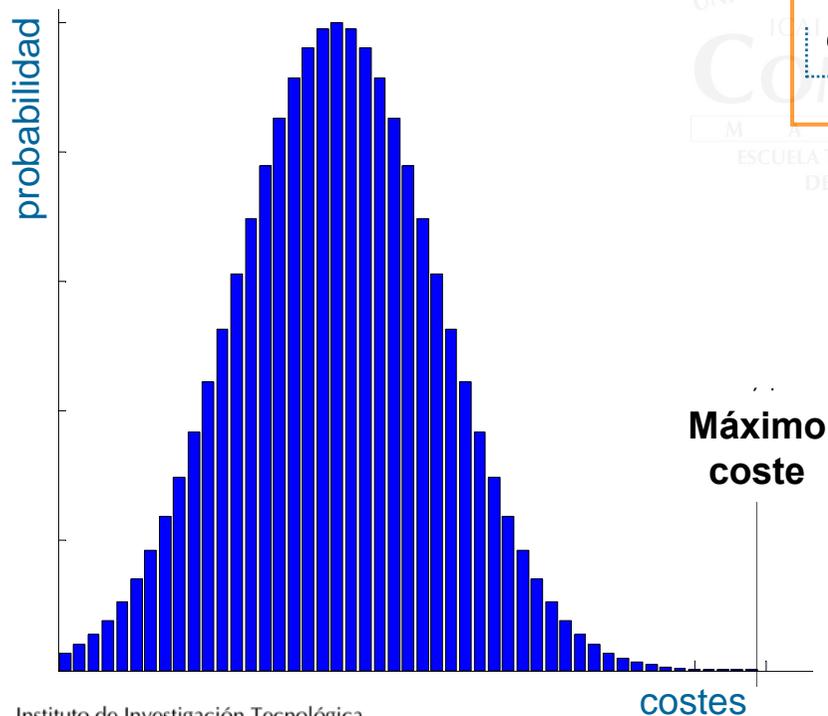
Cálculo de desviaciones positivas respecto a la referencia R

PLANTEAMIENTO ESTOCÁSTICO

Modelo nivel de seguridad

➤ Medida de riesgo

Coste máximo de la distribución



$$\min E[c_T]$$

$$c_T \in X$$

$$c_T^g \leq S \quad \forall g \in G$$

Coste total esperado

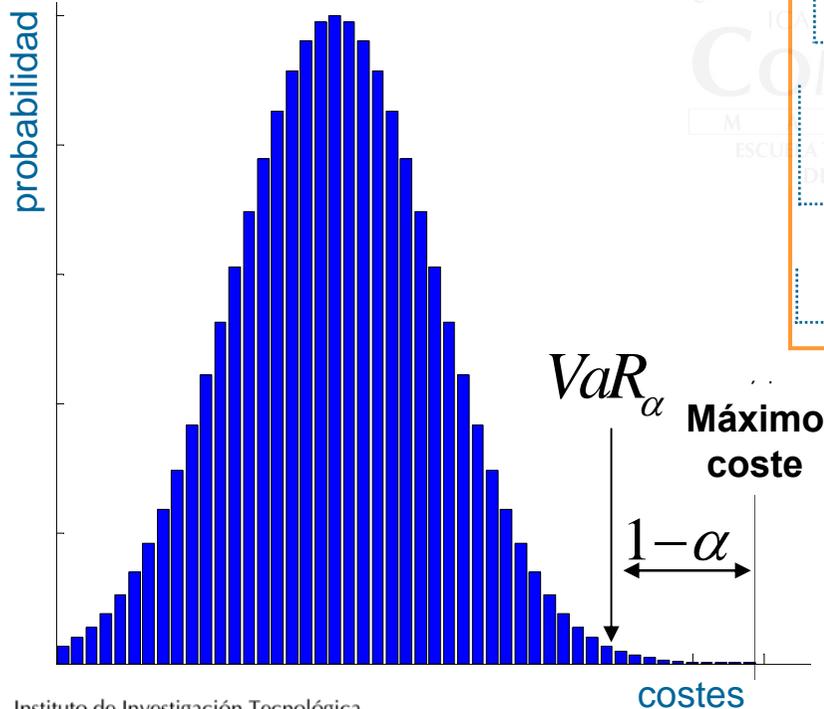
Coste de los escenarios limados a un Nivel de seguridad S (parámetro aversión riesgo)

PLANTEAMIENTO ESTOCÁSTICO

Modelo Valor en riesgo (VaR)

➤ Medida de riesgo

Coste máximo para un nivel de confianza α



$$\min VaR_\alpha$$

$$c_T \in X$$

$$E[c_T] \leq S$$

$$\sum_{g \in G} p^g \delta^g \leq 1 - \alpha \quad \forall g \in G$$

$$c_T^g \leq VaR_\alpha + M \delta^g \quad \forall g \in G$$

Variable binaria auxiliar para cada escenario g

Constante superior al valor de cualquier escenario

Medida de riesgo

Coste esperado limitado por parámetro de aversión al riesgo S

Limita el nº de var. Delta al nº de escenarios de valor superior al VaR

Establece el escenario del VaR

APLICACIÓN NUMÉRICA

Datos de entrada

➤ **Fábrica de celulosa de algodón**

➤ **Días tipo:** Laborable/Fabricando Laborable/Parada
 Festivo/Fabricando Festivo/Parada

➤ **3 periodos/día tipo:**
90 periodos

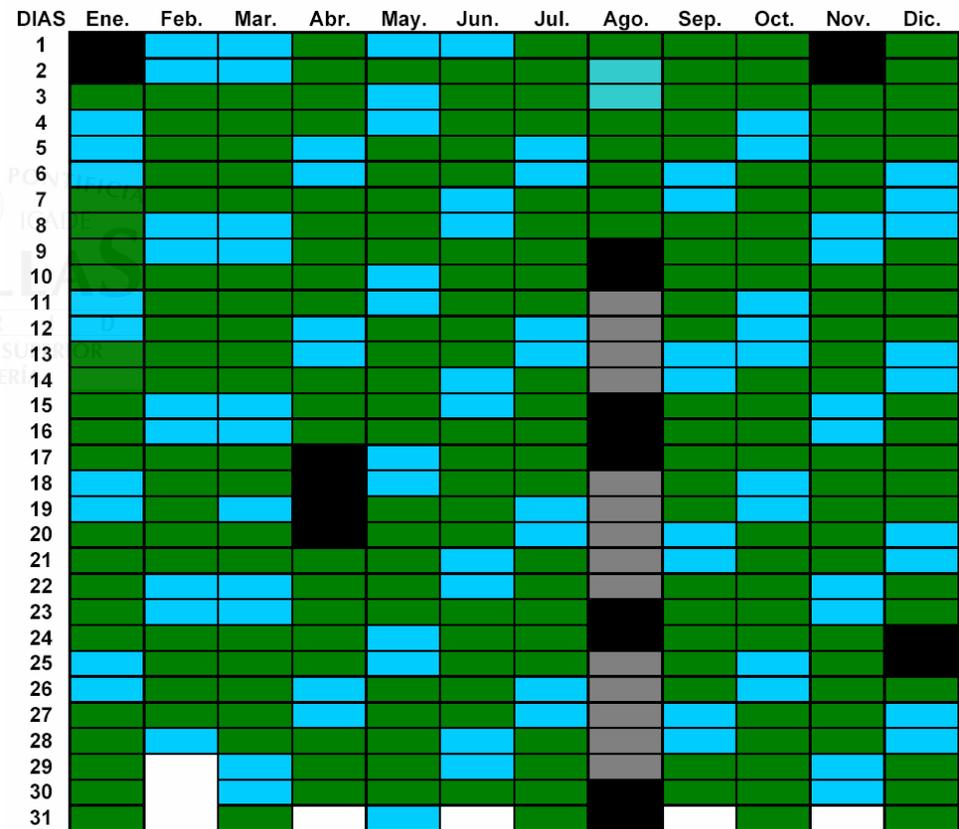
➤ **15 escenarios de precios:**

- ✓ 5 de combustibles
- ✓ 3 de electricidad

➤ **1350 nodos**

➤ **23 contratos:**

- ✓ 12 compra electricidad
- ✓ 4 gas natural
- ✓ 4 fueloil
- ✓ 3 venta electricidad



APLICACIÓN NUMÉRICA

Tamaño y resolución

➤ Programado en GAMS, resuelto con CPLEX

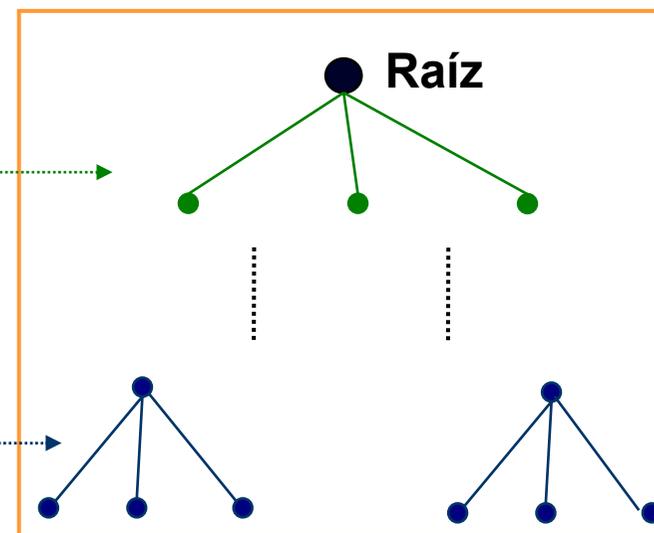
➤ Tamaño

	Determinista	Estocástico
Restricciones	5.883	88.035
Variables	8.677	129.879
Binarias	1.087	16.043
Coef. no cero	32.887	492.818

➤ Algoritmo resolución Branch&Bound:
prioridades de ramificación

Contratos
(primer nivel ramificación)

Estado caldera y cogeneración
(último nivel ramificación)



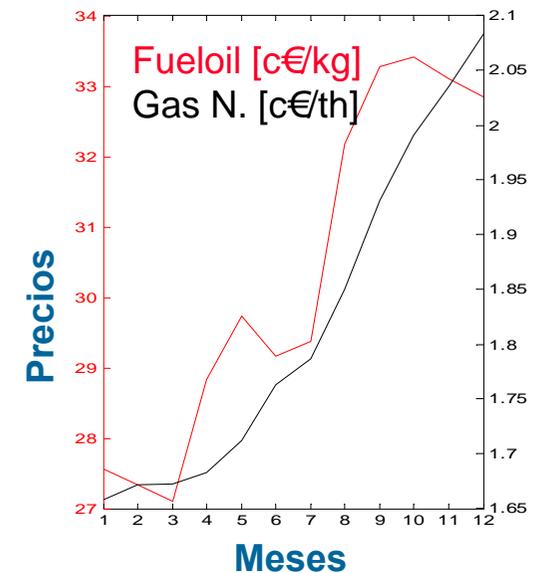
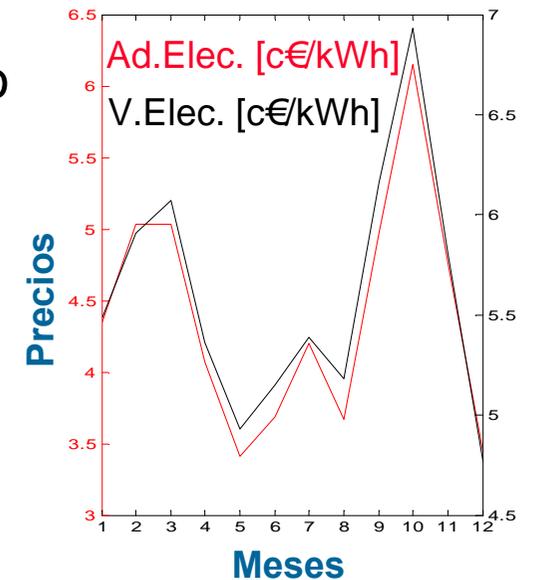
APLICACIÓN NUMÉRICA

Determinista: Operación 1 escenario

- **Cogeneración en producción: 7032 h/año**
 - ✓ Rendimiento: 55.1%, exporta 65% de lo generado
- **Caldera en producción: 936 h/año**

Cantidades consumidas o vendidas

Mes	Fueloil [t]	Gas natural [km ³]	E ^a eléctrica adquirida [MWh]	E ^a eléctrica vendida [MWh]
1		468.9	0.5	1196.9
2		458.3		1180.5
3		513.0		1331.5
4		418.9	1.0	1066.5
5	15.0	440.0	86.0	1120.5
6	44.4	320.2	258.1	843.1
7	46.0	332.8	266.7	879.7
8	11.9	86.1	74.4	228.0
9		481.3		1146.5
10		500.8		1277.6
11		450.6	0.5	1146.5
12	57.5	257.5	313.3	670.9
Total	174.8	4728.3	1000.5	12088.4



APLICACIÓN NUMÉRICA

Determinista: Contratos 15 escenarios

➤ 7 carteras de contratos diferentes

COSTE DE LOS CONTRATOS [k€]

		Escenario	Elect. (compra)	Fueloil	Gas natural	Elect. (venta)	Función objetivo	
Precios combustibles altos	{	1		0.3		1024.5	827.3	658.0
		2	30.4		50.9	903.3	754.0	650.6
		3		0.3		1022.8	917.8	565.0
Precios electricidad: bajos medios altos	{	4		0.3		992.1	827.3	625.7
		5		0.3		979.6	816.5	618.9
		6		0.3		990.7	917.9	532.8
		7		0.3		911.6	827.3	545.1
		8		0.3		911.5	832.4	539.4
		9		0.3		912.0	917.7	454.3
Precios combustibles bajos	{	10		0.3		893.8	827.2	527.3
		11		0.3		894.1	832.7	521.7
		12	0.3			895.4	918.8	437.0
		13		0.3		831.8	824.1	467.7
		14		0.3		834.1	831.1	462.9
		15	0.3			836.9	918.2	379.1

P. FIJO POR CONSUMO

P. FIJO INDEXADO

P. POR DIFERENCIAS

P. FIJO

P. MERCADO

P. MERCADO + LIMITES

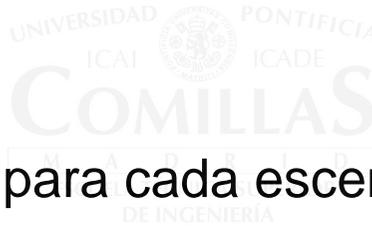


APLICACIÓN NUMÉRICA

Determinista: Metodología de análisis de escenarios multiatributo

- **Determinación de los contratos en dos etapas**
 - ✓ **Etapa 1:** Contratos con peso elevado en la función objetivo:
Contratos de gas y venta de electricidad
 - ✓ **Etapa 2:** Contratos con poco peso en la función objetivo:
Contratos de fueloil y compra de electricidad

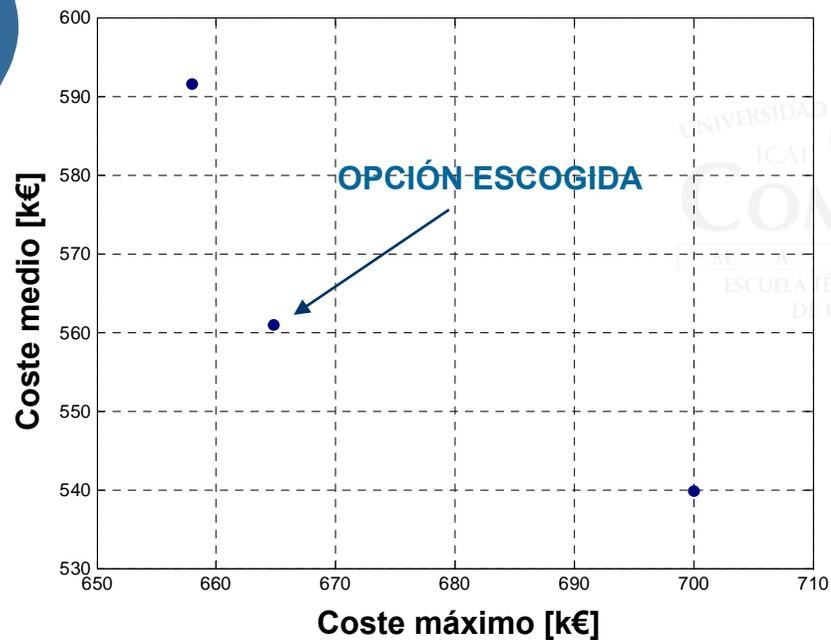
- **Para cada etapa:**
 - ✓ Resolver el modelo para cada escenario
 - ✓ Escoger soluciones: neutral al riesgo, actitud poco aversa y muy aversa al riesgo
 - ✓ Resolver para cada escenario y cada solución escogida
 - ✓ Escoger solución en función de la medida de riesgo y actitud



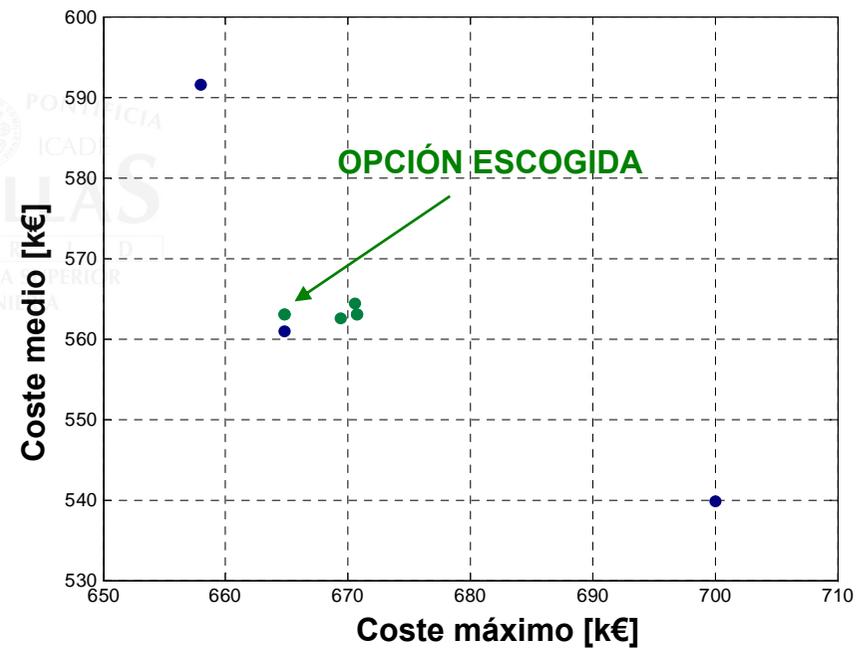
APLICACIÓN NUMÉRICA

Determinista: Metodología de análisis de escenarios multiatributo

CONTRATOS DE GAS Y VENTA ELECTRICIDAD



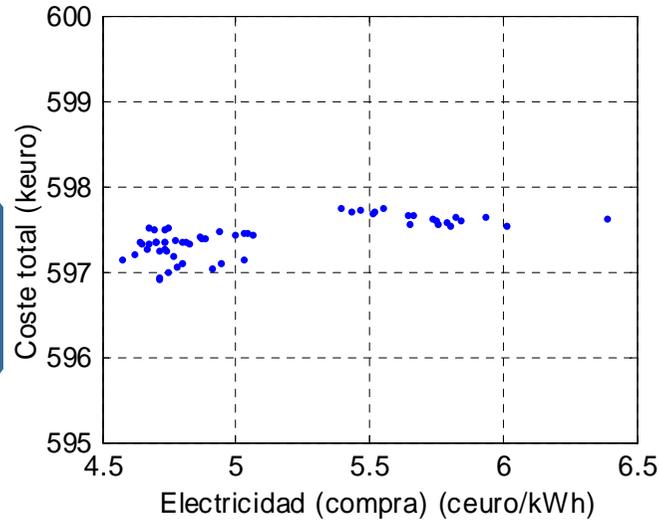
CONTRATOS DE FUELOIL Y COMPRA ELECTRICIDAD



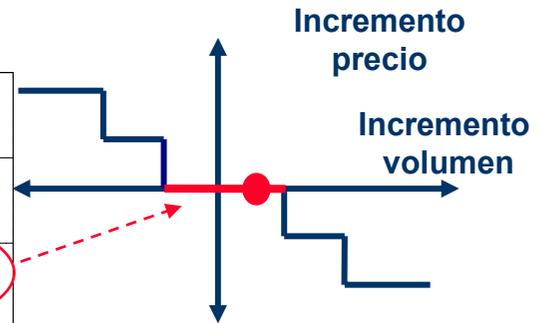
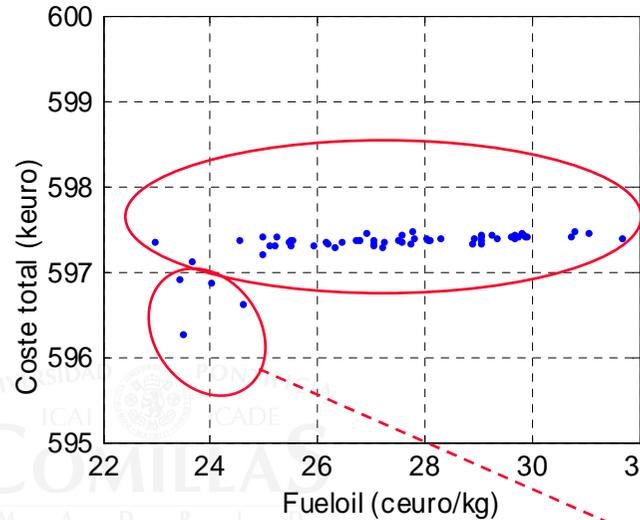
APLICACIÓN NUMÉRICA

Determinista: Análisis de sensibilidad

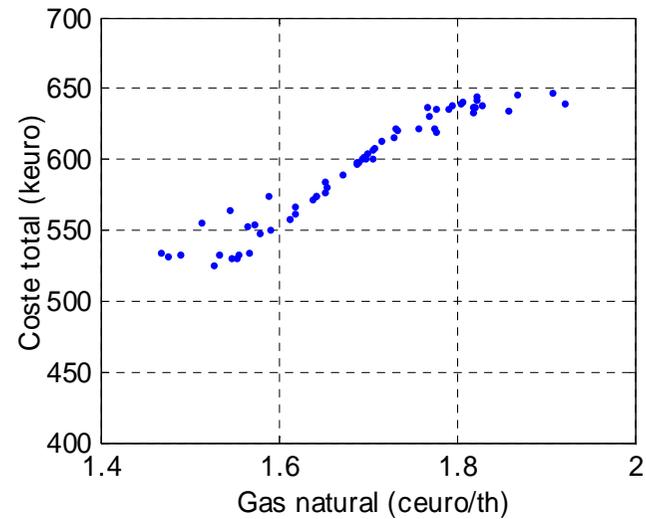
P. MERCADO + LIMITES DE PRECIO



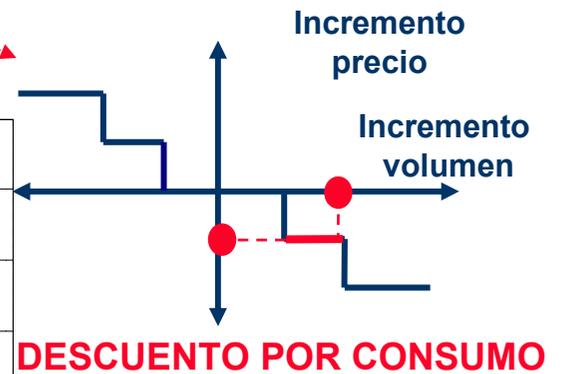
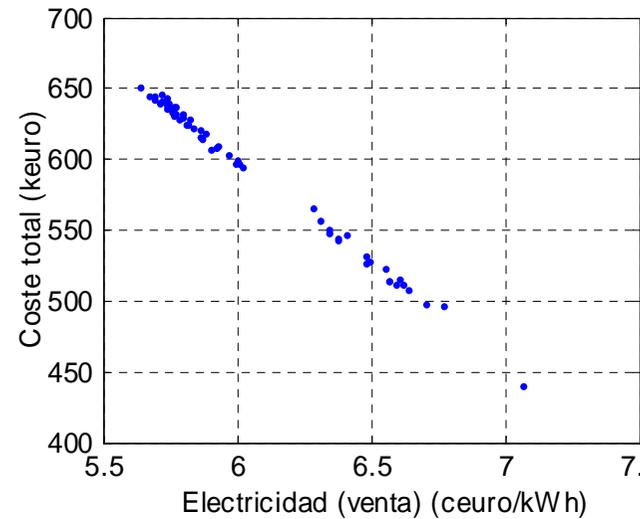
P. MERCADO + DESCUENTO POR CONSUMO



P. MERCADO + LIMITES DE PRECIO



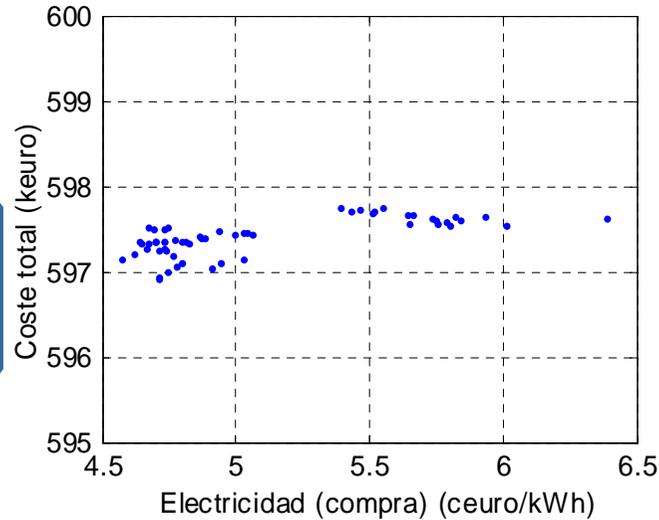
P. MERCADO



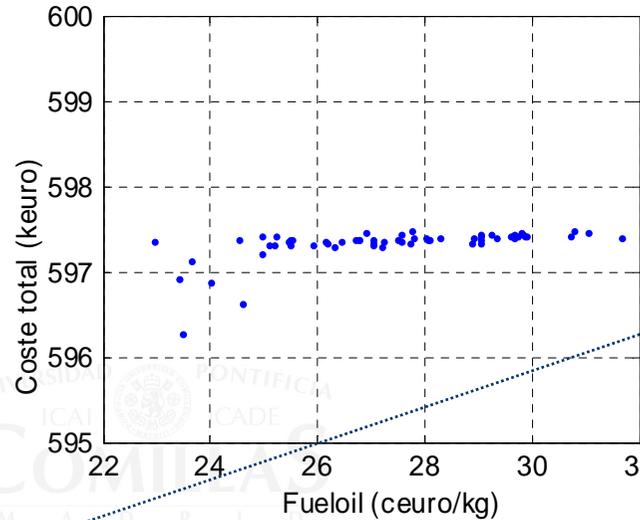
APLICACIÓN NUMÉRICA

Determinista: Análisis de sensibilidad

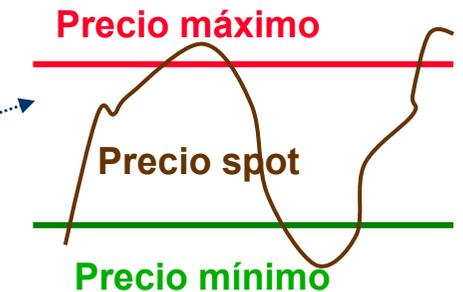
P. MERCADO + LIMITES DE PRECIO



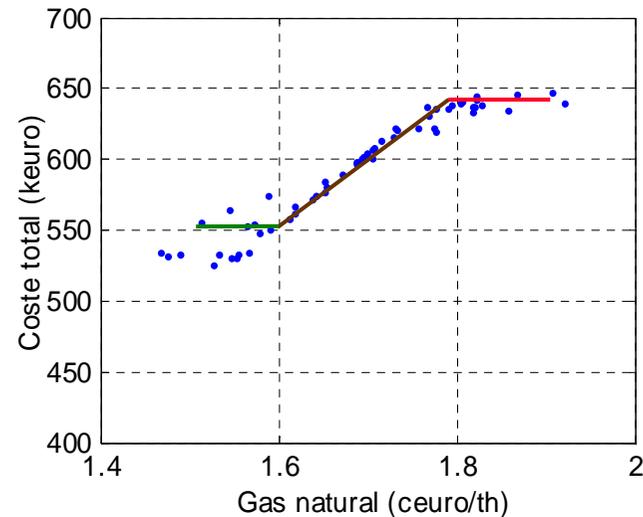
P. MERCADO + DESCUENTO POR CONSUMO



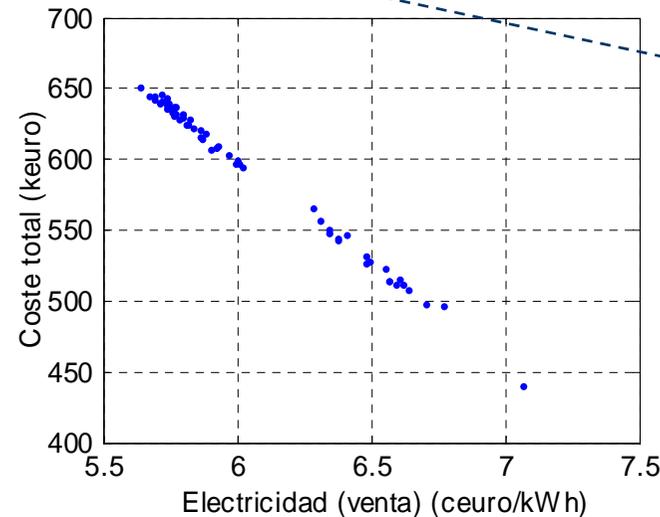
- Zona lineal:
 $\Delta 0.1 \text{ c€}/\text{th} \rightarrow$
 $\Delta 33 \text{ k€}$ coste



P. MERCADO + LIMITES DE PRECIO



P. MERCADO



- Mayor correlación lineal
- Mayor riesgo
- $\Delta 0.5 \text{ c€}/\text{kWh} \rightarrow$
 $\text{ahorro } 72\text{k€}$



APLICACIÓN NUMÉRICA

Estocástico: Frontera eficiente

➤ Modelo nivel de seguridad

- ✓ **Procedimiento obtención frontera eficiente:**
 - **Primera iteración:** resolución del modelo neutral al riesgo
 - **Resto iteraciones** (mientras es factible el problema): decremento del parámetro de aversión al riesgo
- ✓ **En cada iteración se obtienen:**
 - Soluciones óptimas de las variables de las dos etapas
 - Una cartera de contratos diferente

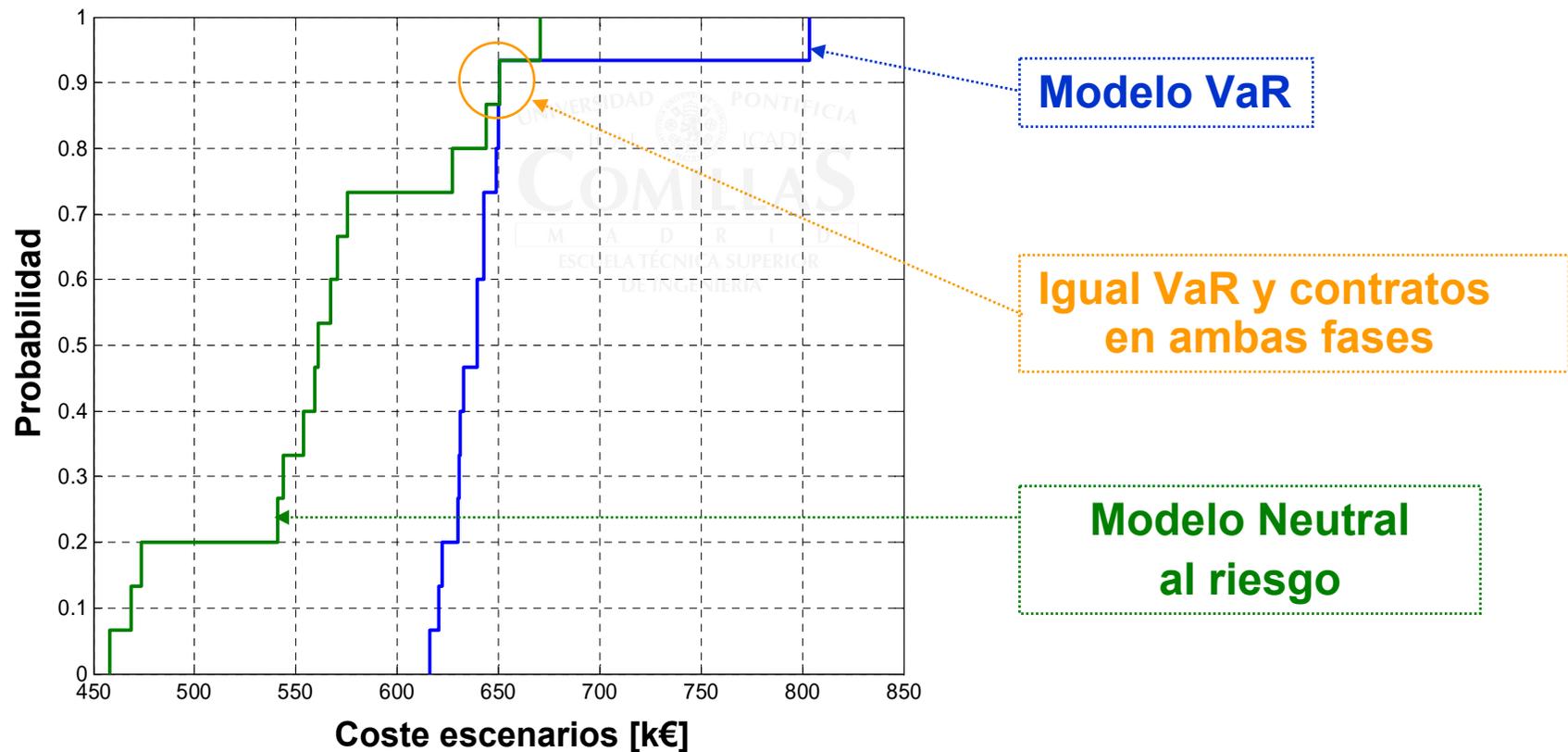
➤ Modelo valor en riesgo (VaR)

- ✓ Obtiene soluciones óptimas de la primera etapa
- ✓ Obtiene soluciones óptimas de la segunda etapa únicamente para el escenario del VaR
- ✓ **Inconvenientes:**
 - No siempre se obtiene una solución diferente de contratos al disminuir el parámetro de aversión al riesgo
 - Difícil obtener la operación óptima de la fábrica

APLICACIÓN NUMÉRICA

Estocástico: Metodología determinación front. efic. con modelo VaR

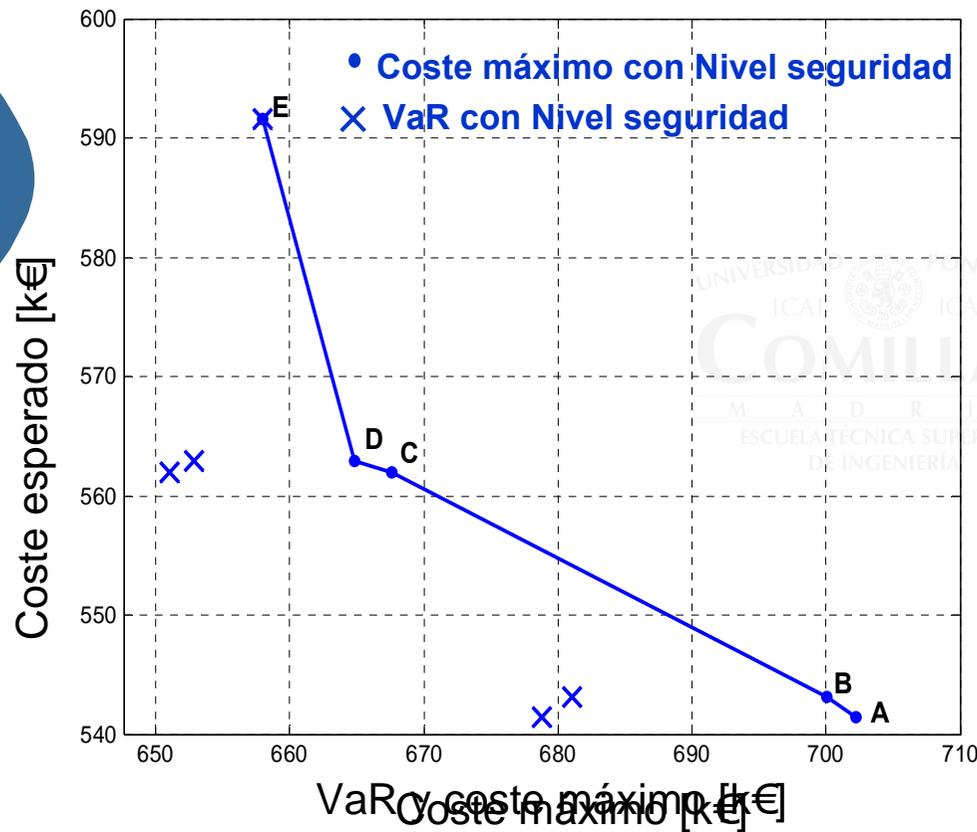
- **Fase 1: Resoluciones modelos VaR**
 - ✓ Determinación contratos (**variable primera etapa**)
- **Fase 2: Resoluciones modelos neutral al riesgo**
 - ✓ Determinación operación (**variables segunda etapa**)



APLICACIÓN NUMÉRICA

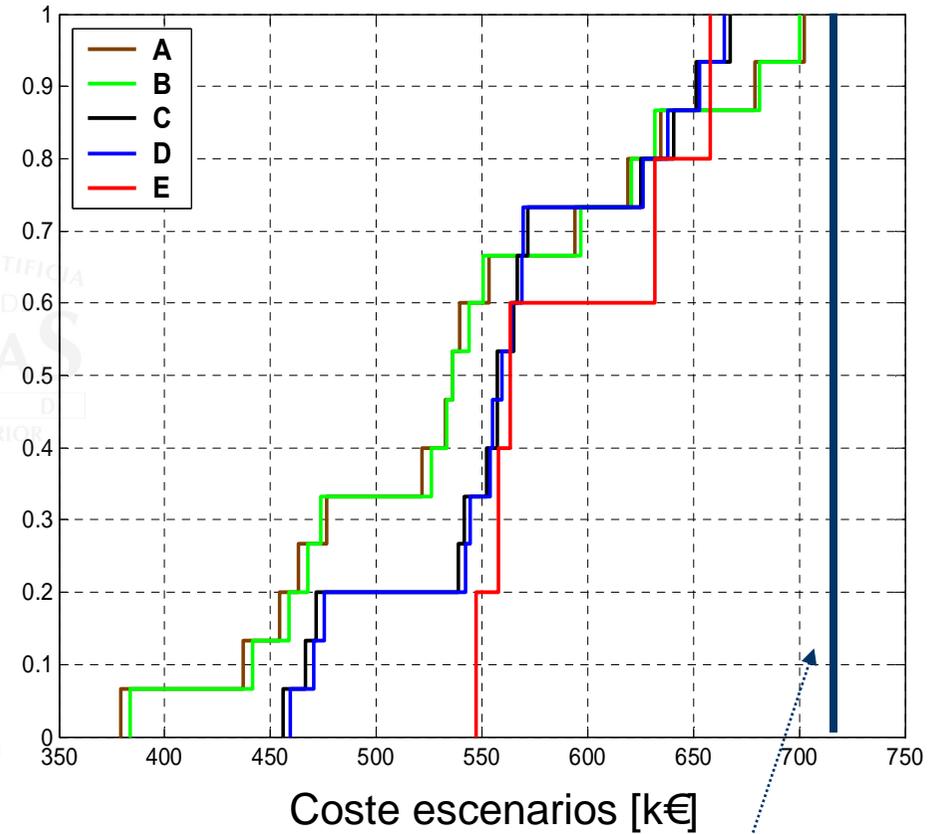
Estocástico: Fronteras eficientes

➤ Modelos nivel de seguridad y VaR (nivel de confianza 0.9)



Solución 1 = A
Solución 3 = C

Funciones de distribución modelo nivel seguridad



Contratos a precio fijo



Aplicación de la optimización a la toma de decisiones en el mercado eléctrico

Andrés Ramos

Universidad Pontificia Comillas, Madrid

24 de octubre de 2005