



---

# Planificación de la Generación de Energía Eléctrica

Informe del trabajo

**Grupo 8**

---

José López Gea  
Jorge Villarán Moradillo  
Ángel Amando Gil Álamo  
Jose Luis López Galindo

## Índice

Primera Parte: Descripción del problema .....3

Segunda Parte: Modelos deterministas .....4

❖ **Modelo 1 ..... 4**

Descripción ..... 4

Modelización ..... 4

Resultados ..... 5

Comentarios ..... 6

❖ **Modelo 2 ..... 6**

Descripción ..... 6

Modelización ..... 6

Resultados ..... 7

Comentarios ..... 8

❖ **Modelo 3 ..... 8**

Descripción ..... 8

Modelización ..... 8

Resultados ..... 9

Comentarios ..... 10

❖ **Modelo 4 ..... 10**

Descripción ..... 10

Modelización ..... 10

Resultados ..... 12

Comentarios ..... 12

Tercera Parte: Modelo estocástico .....13

❖ **Modelo 5 ..... 13**

Descripción ..... 13

Modelización ..... 13

Resultados ..... 14

Comentarios ..... 14

Anexo: Código en GAMS .....15

## Primera Parte: Descripción del problema

Considérese un sistema de generación de energía eléctrica que estuviera compuesto por un número de centrales o **grupos térmicos** y unos **hidráulicos**. De cada uno se necesitaría saber sus **características técnicas** como la mínima y la máxima potencia que pueden dar cuando están generando, las variaciones de potencia admisibles entre periodos seguidos, etc. Para sistemas hidroeléctricos las reservas de embalse, la fluyente, las aportaciones...

**La electricidad no puede almacenarse**, de modo que se debe ajustar la producción eléctrica a la demanda o consumo de esta. Para lograr un equilibrio entre la generación y la demanda, se diseñan mecanismos para ajustarlos. En el informe **contemplaremos la operación centralizada donde se gestionan conjuntamente las centrales para minimizar los costes de generación**, aunque en la realidad existen más factores: los mercados donde se compra y vende la energía basándose en las ofertas de compra y venta que envían los operadores (generadores y comercializadoras). En todos los casos, hay que añadir condiciones que además de la demanda prevista tengan en cuenta la sobrecarga del sistema, la congestión de la red, la reserva de energía en caso de emergencia, además de los posibles desvíos del sistema, etc.

Además, se debe tener en cuenta sus **costes asociados a la producción** que pueden venir de la producción misma **de la energía**, o incluso de los costes de oportunidad, como el uso del agua. En el caso de los grupos térmicos son relevantes los **costes de arranque y parada** que suelen considerarse valores fijos, **y los costes de combustible**. En este informe, **no tendremos en cuenta estos últimos**.

Respecto a la demanda, **consideramos una demanda inelástica** (una cantidad determinada fija) aunque también puede ser elástica con el precio, es decir, que depende del precio de venta de la energía, bien representado por ofertas de compra en el mercado o bien con representaciones lineales de descuento. En la operación destacan las diferencias entre mercados centralizados en que un operador busca minimizar los costes de producción a veces junto con otros criterios de seguridad, etc. (modelos denominados de despacho óptimo), mientras que en mercados liberalizados las empresas generadoras envían sus ofertas de venta y las comercializadoras las suyas de compra. **Nuestros modelos se ajustarán a un mercado centralizado: nuestro objetivo es minimizar los costes de producción.**

Otro factor a tener en cuenta es la red de transporte, fundamentalmente por las limitaciones que impone al suministro de la energía. Según sea el alcance de los modelos se dice que son modelos de nudo único si no se incluyen estas limitaciones, o modelos de red si se incluyen. **En nuestro caso**, ningún modelo tendrá en cuenta dichas limitaciones, en otras palabras, **serán modelos de nudo único**.

Por último, hay que tener en cuenta que **los datos con los que se hacen la programaciones y planificaciones pueden incluir una carga de incertidumbre**, muchas veces asociada al comportamiento de los consumidores o a factores externos como las aportaciones que pueden llegar a un embalse, de modo que el sistema sea lo más robusto posible ante variaciones sobre los valores previstos. **Incorporaremos esta incertidumbre mediante un modelo estocástico, el modelo 5.**

## Segunda Parte: Modelos deterministas

### ❖ Modelo 1

#### Descripción

En este modelo buscamos realizar una estructura básica del problema para conseguir satisfacer la demanda, considerando que los costes de producción son exclusivamente el término lineal de la aproximación lineal.

Así, para resolverlo, buscamos restricciones que nos permitan satisfacer la demanda teniendo en cuenta las limitaciones de subida y bajada por grupo y hora, y de mínimos y máximos de capacidad de producción de cada grupo.

#### Modelización

Para este modelo utilizamos los siguientes parámetros y variables:

##### **Variables**

- $WT_{i,h}$ : potencia grupo térmico  $i$  en la hora  $h$  (positiva)
- $Bin_{i,h}$ : 1 si el grupo térmico  $i$  está acoplado en la hora  $h$  (binaria)
- $WH_{j,h}$ : potencia grupo hidráulico  $j$  en la hora  $h$  (positiva)
- $RH_{j,h}$ : reserva del grupo  $j$  al final de la hora  $h$  (positiva)
- $VE_{j,h}$ : vertidos del grupo  $j$  en la hora  $h$  (positiva)

##### **Parámetros**

- $b_i$ : Término lineal de producción
- $dem_h$ : Demanda horaria caso determinista
- $rs_i$ : Rampa de subida [Mw por hora]
- $rb_i$ : Rampa de bajada [Mw por hora]
- $res\_min_j$ : reserva mínima de cada grupo hidráulico [Mw]
- $res\_max_j$ : reserva máxima de cada grupo hidráulico [Mw]
- $res\_ini_j$ : reserva inicial de cada grupo hidráulico [Mw]
- $pmax\_turb_j$ : potencia máxima de cada grupo hidráulico
- $fluy_j$ : Fluyente [Mw]
- $p\_min_i$ : Potencia máxima de cada térmico
- $p\_max_i$ : Potencia mínima de cada térmico

Una vez determinado cada elemento, hemos realizado el siguiente modelo:

$$\begin{aligned}
 \min \quad & z1 = \sum_{i,h} b_i WT_{i,h} \\
 s. a. \quad & dem_h = \sum_i WT_{i,h} + \sum_j WH_{j,h} && \forall h \\
 & rs_i \geq WT_{i,h} - WT_{i,h-1} && \forall i, h \\
 & rb_i \geq WT_{i,h-1} - WT_{i,h} && \forall i, h \\
 & RH_{j,h} \geq res\_min_j && \forall j, h \\
 & RH_{j,h} \leq res\_max_j && \forall j, h \\
 & RH_{j,h} = RH_{j,h-1} + res\_ini_j(\$h == 1) + ap_{h,j} - WH_{j,h} + VE_{j,h} && \forall j, h \\
 & pmax\_turb_j \geq WH_{j,h} + fluy_j && \forall j, h \\
 & WT_{i,h} \leq p\_max_i * Bin_{i,h} && \forall i, h \\
 & WT_{i,h} \geq p\_min_i * Bin_{i,h} && \forall i, h
 \end{aligned}$$

## Resultados

El valor de la función objetivo obtenido para este problema es de 21312 €.

Potencia de los grupos térmicos:

	Hora 1	Hora 2	Hora 3	Hora 4
GAL	200	350	400	250
CAT				
MAD	210	150		
VAL				
EXT-AND	600	900	900	900
CASTL	400	800	800	800

Potencia de los grupos hidráulicos:

	Hora 1	Hora 2	Hora 3	Hora 4
Tajo	190		450	180
Duero	500	200	950	470
Sil	400	400	400	400

Reserva de los grupos hidráulicos:

	Hora 1	Hora 2	Hora 3	Hora 4
Tajo	4179000	4179200	4179000	4179000
Duero	6789000	6789350	6789000	6789000
Sil	2598820	2598670	2598200	2598000

Vertidos de los grupos hidráulicos:

	Hora 1	Hora 2	Hora 3	Hora 4
Tajo				
Duero				
Sil		1330		

### Comentarios

Al considerar tan solo el término lineal, coste de este modelo es bastante inferior al de los que veremos a continuación.

**- ¿Cuánto aumentaría en cada hora el coste si la demanda de cada hora fuera 1 MW más sin resolver el modelo completo?**

En este caso miramos la solución y miramos los valores de las variables duales, que nos indican que el coste aumentaría en 14€ en total (de manera individual serían 3€, 3€, 5€ y 4€ para las horas 1, 2, 3 y 4 respectivamente) cada hora si no tuviésemos en cuenta las rampas de subida y bajada.

## ❖ Modelo 2

### Descripción

En este modelo se nos propone la ligera modificación del anterior considerando un precio único para cada Mw, que sea según los precios de cada grupo que está operando en ese tramo horario, así que añadimos esa restricción. También cambiamos levemente la función objetivo para que siga siendo lineal.

### Modelización

Para este modelo, además de los definidos en el modelo 1, añadimos la siguiente variable:

#### Variable

- $\lambda_h$  : Máximo coste unitario de los grupos en cada hora (positiva)

El modelo pasaría a añadir una nueva restricción para establecer el precio máximo:

$$\begin{aligned}
 \min \quad & z2 = \sum_h \lambda_h Dem_h \\
 s. a. \quad & \lambda_h \geq b_i * Bin_{i,h} && \forall i, h \\
 & dem_h = \sum_i WT_{i,h} + \sum_j WH_{j,h} && \forall h \\
 & rs_i \geq WT_{i,h} - WT_{i,h-1} && \forall i, h \\
 & rb_i \geq WT_{i,h-1} - WT_{i,h} && \forall i, h \\
 & RH_{j,h} \geq res\_min_j && \forall j, h \\
 & RH_{j,h} \leq res\_max_j && \forall j, h \\
 & RH_{j,h} = RH_{j,h-1} + res\_ini_j(\$h == 1) + ap_{h,j} - WH_{j,h} + VE_{j,h} && \forall j, h \\
 & pmax\_turb_j \geq WH_{j,h} + fluy_j && \forall j, h \\
 & WT_{i,h} \leq p\_max_i * Bin_{i,h} && \forall i, h \\
 & WT_{i,h} \geq p\_min_i * Bin_{i,h} && \forall i, h
 \end{aligned}$$

## Resultados

El valor obtenido para la función objetivo de este modelo es de 47610 €

Potencia de los grupos térmicos:

	Hora 1	Hora 2	Hora 3	Hora 4
GAL	200	400	300	
CAT				
MAD	400	200		
VAL	100			
EXT-AND	600	900	900	900
CASTL	400	800	800	800

Máximo coste unitario de los grupos en cada hora:

	Hora 1	Hora 2	Hora 3	Hora 4
Coste (Mw/h)	4.5	4.2	4.0	3.0

Potencia de los grupos hidráulicos:

	Hora 1	Hora 2	Hora 3	Hora 4
Tajo			440	380
Duero	400	100	1060	560
Sil	400	400	400	360

Reserva de los grupos hidráulicos:

	Hora 1	Hora 2	Hora 3	Hora 4
Tajo	4179190	4179390	4179200	4179000
Duero	6789100	6789550	6789090	6789000
Sil	2598820	2598670	2598160	2598000

Vertidos de los grupos hidráulicos:

	Hora 1	Hora 2	Hora 3	Hora 4
Tajo				
Duero				
Sil			410	

### Comentarios

El resultado cumple con las condiciones indicadas en el enunciado. Observamos que el coste es bastante superior con respecto al modelo anterior, lo cual tiene sentido ya que se coge el coste máximo cada hora.

## ❖ Modelo 3

### Descripción

En este apartado cambiamos la aproximación del coste a la cuadrática, además de añadir los costes de arranque y parada, para lo cual hacemos uso de las variables binarias utilizadas también en los modelos anteriores para ver qué grupos están operando, ayudándonos también con un par de variables auxiliares.

### Modelización

Para este modelo utilizamos los siguientes parámetros y variables:

#### Variables

- $WT_{i,h}$ : potencia grupo térmico  $i$  en la hora  $h$  (positiva)
- $Bin_{i,h}$ : 1 si el grupo térmico  $i$  está acoplado en la hora  $h$  (binaria)
- $WH_{j,h}$ : potencia grupo hidráulico  $j$  en la hora  $h$  (positiva)
- $RH_{j,h}$ : reserva del grupo  $j$  al final de la hora  $h$  (positiva)
- $VE_{j,h}$ : vertidos del grupo  $j$  en la hora  $h$  (positiva)
- $Cp_{aux_{i,h}}$ : coste de parada de cada grupo en cada hora (positiva)
- $Ca_{aux_{i,h}}$ : coste de arranque de cada grupo en cada hora (positiva)



## Parámetros

- $g_i$ : Término independiente
- $z_i$ : Término lineal de producción
- $c_i$ : Término cuadrático
- $b_i$ : Término lineal de producción
- $dem_h$ : Demanda horaria caso determinista
- $rs_i$ : Rampa de subida [Mw por hora]
- $rb_i$ : Rampa de bajada [Mw por hora]
- $res\_min_j$ : reserva mínima de cada grupo hidráulico [Mw]
- $res\_max_j$ : reserva máxima de cada grupo hidráulico [Mw]
- $res\_ini_j$ : reserva inicial de cada grupo hidráulico [Mw]
- $pmax\_turb_j$ : potencia máxima de cada grupo hidráulico
- $fluy_j$ : Fluyente [Mw]
- $p\_min_i$ : Potencia máxima de cada térmico
- $p\_max_i$ : Potencia mínima de cada térmico
- $ca_i$ : Coste de arranque del grupo i
- $cp_i$ : Coste de parada del grupo i

Una vez determinado cada elemento, hemos realizado el siguiente modelo:

$$\begin{aligned}
 \min \quad & z3 = \sum_{i,h} (g_i Bin_{i,h} + z_i WT_{i,h} + c_i WT_{i,h}^2 + Ca\_aux_{i,h} + Cp\_aux_{i,h}) \\
 s. a. \quad & Cp_{aux_{i,h}} \geq cp_i (Bin_{i,h} - Bin_{i,h-1}) \quad \forall i, h \\
 & Ca\_aux_{i,h} \geq -ca_i (Bin_{i,h} - Bin_{i,h-1}) \quad \forall i, h \\
 & dem_h = \sum_i WT_{i,h} + \sum_j WH_{j,h} \quad \forall h \\
 & rs_i \geq WT_{i,h} - WT_{i,h-1} \quad \forall i, h \\
 & rb_i \geq WT_{i,h-1} - WT_{i,h} \quad \forall i, h \\
 & RH_{j,h} \geq res\_min_j \quad \forall j, h \\
 & RH_{j,h} \leq res\_max_j \quad \forall j, h \\
 & RH_{j,h} = RH_{j,h-1} + res\_ini_j (\$h == 1) + ap_{h,j} - WH_{j,h} + VE_{j,h} \quad \forall j, h \\
 & pmax\_turb_j \geq WH_{j,h} + fluy_j \quad \forall j, h \\
 & WT_{i,h} \leq p\_max_i * Bin_{i,h} \quad \forall i, h \\
 & WT_{i,h} \geq p\_min_i * Bin_{i,h} \quad \forall i, h
 \end{aligned}$$

## Resultados

El valor obtenido para el coste de este modelo es de 20603.20€.

Potencia de los grupos térmicos:

	Hora 1	Hora 2	Hora 3	Hora 4
GAL				
CAT				
MAD	400	200		
VAL	240	240	240	240
EXT-AND	600	900	900	900
CASTL	400	800	800	800

Potencia de los grupos hidráulicos:

	Hora 1	Hora 2	Hora 3	Hora 4
<b>Tajo</b>	97.892		540	182.108
<b>Duero</b>	362.108	260	1020	477.892
<b>Sil</b>	400	400	400	400

Reserva de los grupos hidráulicos:

	Hora 1	Hora 2	Hora 3	Hora 4
<b>Tajo</b>	4179092.108	4179292.108	4179002.108	4179000
<b>Duero</b>	6789137.892	6789427.892	6789007.892	6789000
<b>Sil</b>	2598820	2598670	2598200	2598000

Vertidos de los grupos hidráulicos:

	Hora 1	Hora 2	Hora 3	Hora 4
<b>Tajo</b>				
<b>Duero</b>				
<b>Sil</b>			370	

## Comentarios

Qué grupos arrancan o paran entre cada tramo horario se puede observar a partir de la tabla de programación horaria de los grupos: quien antes no tenía producción y en la hora siguiente sí, ha arrancado; quien antes producía y a la hora siguiente no, ha parado.

## ❖ Modelo 4

### Descripción

Aquí buscamos añadir, respecto al modelo 1, la reserva rodante, es decir, que los grupos que están produciendo energía sean capaces de asumir los ligeros cambios debidos a que la demanda no es constante, sino que puede sufrir pequeñas variaciones a lo largo del tramo horario en cuestión. Además, consideramos la aproximación lineal de los costes de producción.

### Modelización

Para este modelo utilizamos los siguientes parámetros y variables:

## Variables

- $WT_{i,h}$ : potencia grupo térmico i en la hora h (positiva)
- $Bin_{i,h}$ : 1 si el grupo térmico i está acoplado en la hora h (binaria)
- $WH_{j,h}$ : potencia grupo hidráulico j en la hora h (positiva)
- $RH_{j,h}$ : reserva del grupo j al final de la hora h (positiva)
- $VE_{j,h}$ : vertidos del grupo j en la hora h (positiva)
- $Cp_{aux_{i,h}}$ : coste de parada de cada grupo en cada hora (positiva)
- $Ca_{aux_{i,h}}$ : coste de arranque de cada grupo en cada hora (positiva)

## Parámetros

- $a_i$ : Término independiente
- $b_i$ : Término lineal de producción
- $dem_h$ : Demanda horaria caso determinista
- $rs_i$ : Rampa de subida [Mw por hora]
- $rb_i$ : Rampa de bajada [Mw por hora]
- $res_{min_j}$ : reserva mínima de cada grupo hidráulico [Mw]
- $res_{max_j}$ : reserva máxima de cada grupo hidráulico [Mw]
- $res_{ini_j}$ : reserva inicial de cada grupo hidráulico [Mw]
- $pmax_{turb_j}$ : potencia máxima de cada grupo hidráulico
- $fluy_j$ : Fluyente [Mw]
- $p_{min_i}$ : Potencia máxima de cada térmico
- $p_{max_i}$ : Potencia mínima de cada térmico
- $ca_i$ : Coste de arranque del grupo i
- $cp_i$ : Coste de parada del grupo i
- $res_r$ : Reserva rodante

Una vez determinado cada elemento, hemos realizado el siguiente modelo:

$$\begin{aligned}
 \min \quad & z4 = \sum_{i,h} (a_i Bin_{i,h} + b_i WT_{i,h} + Ca_{aux_{i,h}} + Cp_{aux_{i,h}}) \\
 s. a. \quad & \sum_i p_{max_i} Bin_{i,h} \geq dem_h res_r + \sum_i WT_{i,h} && \forall h \\
 & Cp_{aux_{i,h}} \geq cp_i (Bin_{i,h} - Bin_{i,h-1}) && \forall i, h \\
 & Ca_{aux_{i,h}} \geq -ca_i (Bin_{i,h} - Bin_{i,h-1}) && \forall i, h \\
 & dem_h = \sum_i WT_{i,h} + \sum_j WH_{j,h} && \forall h \\
 & rs_i \geq WT_{i,h} - WT_{i,h-1} && \forall i, h \\
 & rb_i \geq WT_{i,h-1} - WT_{i,h} && \forall i, h \\
 & RH_{j,h} \geq res_{min_j} && \forall j, h \\
 & RH_{j,h} \leq res_{max_j} && \forall j, h \\
 & RH_{j,h} = RH_{j,h-1} + res_{ini_j} (\$h == 1) + ap_{h,j} - WH_{j,h} + VE_{j,h} && \forall j, h \\
 & pmax_{turb_j} \geq WH_{j,h} + fluy_j && \forall j, h \\
 & WT_{i,h} \leq p_{max_i} * Bin_{i,h} && \forall i, h \\
 & WT_{i,h} \geq p_{min_i} * Bin_{i,h} && \forall i, h
 \end{aligned}$$

## Resultados

El valor de la función objetivo obtenido para este modelo es de un coste de 22355 €.

Potencia de los grupos térmicos:

	Hora 1	Hora 2	Hora 3	Hora 4
GAL	200	390	170	100
CAT				
MAD	250	150	150	150
VAL				
EXT-AND	600	900	900	900
CASTL	400	800	800	800

Potencia de los grupos hidráulicos:

	Hora 1	Hora 2	Hora 3	Hora 4
<b>Tajo</b>	190	30	420	180
<b>Duero</b>	460	130	1060	470
<b>Sil</b>	400	400	400	400

Reserva de los grupos hidráulicos:

	Hora 1	Hora 2	Hora 3	Hora 4
<b>Tajo</b>	4179000	4179170	4179000	4179000
<b>Duero</b>	6789040	6789460	6789000	6789000
<b>Sil</b>	2598820	2598670	2598200	2598000

Vertidos de los grupos hidráulicos:

	Hora 1	Hora 2	Hora 3	Hora 4
<b>Tajo</b>				
<b>Duero</b>				
<b>Sil</b>			370	

## Comentarios

Teniendo en cuenta que hemos añadido los costes de arranque y parada, la reserva rodante y completado la aproximación lineal del coste, no aumenta de una manera demasiado significativa con respecto al Modelo 1.

## Tercera Parte: Modelo estocástico

### ❖ Modelo 5

#### Descripción

Por último, se nos propone realizar un modelo igual al anterior pero con una demanda estocástica en lugar de determinista. Para ello, tenemos que convertir en estocásticos todos los valores que dependan de dicha demanda.

#### Modelización

Para este modelo utilizamos los siguientes parámetros y variables:

##### Variables

- $WT_{i,h,s}$ : potencia grupo térmico  $i$  en la hora  $h$  (positiva)
- $BinS_{i,h,s}$ : 1 si el grupo térmico  $i$  está acoplado en la hora  $h$  (binaria)
- $WH_{j,h}$ : potencia grupo hidráulico  $j$  en la hora  $h$  (positiva)
- $RH_{j,h}$ : reserva del grupo  $j$  al final de la hora  $h$  (positiva)
- $VE_{j,h}$ : vertidos del grupo  $j$  en la hora  $h$  (positiva)
- $Cp_{aux_{i,h,s}}$ : coste de parada de cada grupo en cada hora (positiva)
- $Ca_{aux_{i,h,s}}$ : coste de arranque de cada grupo en cada hora (positiva)

##### Parámetros

- $a_i$ : Término independiente
- $b_i$ : Término lineal de producción
- $dem_h$ : Demanda horaria caso determinista
- $rs_i$ : Rampa de subida [Mw por hora]
- $rb_i$ : Rampa de bajada [Mw por hora]
- $res\_min_j$ : reserva mínima de cada grupo hidráulico [Mw]
- $res\_max_j$ : reserva máxima de cada grupo hidráulico [Mw]
- $res\_ini_j$ : reserva inicial de cada grupo hidráulico [Mw]
- $pmax\_turb_j$ : potencia máxima de cada grupo hidráulico
- $fluy_j$ : Fluyente [Mw]
- $p\_min_i$ : Potencia máxima de cada térmico
- $p\_max_i$ : Potencia mínima de cada térmico
- $ca_i$ : Coste de arranque del grupo  $i$
- $cp_i$ : Coste de parada del grupo  $i$
- $res\_r$ : Reserva rodante
- $M_{s,h}$ : Matriz de escenarios

Una vez determinado cada elemento, hemos realizado el siguiente modelo:

$$\begin{aligned}
 \min \quad & z_{est} = \sum_{sa/M_{s,h}=sa;} i_{j,s,sa} \text{ prob}_s * (a_i \text{Bin}_{i,h,sa} + b_i \text{WT}_{i,h,sa} + \text{Ca\_aux}_{i,h,sa} + \text{Cp\_aux}_{i,h,sa}) \\
 \text{s. a.} \quad & \text{WTS}_{i,h,sa} \leq p_{\max_i} \text{Bin}_{i,h,sa} & \forall i, h, s, sa, \quad M_{s,h} = sa \\
 & \text{WTS}_{i,h,sa} \geq p_{\min_i} \text{Bin}_{i,h,sa} & \forall i, h, s, sa, \quad M_{s,h} = sa \\
 & \sum_i \text{WTS}_{i,h,sa} + \sum_j \text{WH}_{i,j} = \text{dem}_{s,h} & \forall i, h, s, sa, \quad M_{s,h} = sa \\
 & \text{CP\_AUX}_{i,h,sa} \geq \text{cp}_i (\text{Bin}_{i,h-1,sa} - \text{Bin}_{i,h,sa}) & \forall i, h, s, sa, sb, M_{s,h} = sa, \\
 M_{s,h-1} = sb, h > 1 & \\
 & \text{CA\_AUX}_{i,h,sa} \geq -\text{ca}_i (\text{Bin}_{i,h-1,sa} - \text{Bin}_{i,h,sa}) & \forall i, h, s, sa, sb, M_{s,h} = sa, \\
 M_{s,h-1} = sb, h > 1 & \\
 & \text{WTS}_{i,h,sa} \leq \text{WTS}_{i,h-1,sa} + \text{rs}_i & \forall i, h, s, sa, sb, \quad M_{s,h} = sa, \\
 M_{s,h-1} = sb, h > 1 & \\
 & \text{WTS}_{i,h,sa} \geq \text{WTS}_{i,h-1,sa} - \text{rb}_i & \forall i, h, s, sa, sb, \quad M_{s,h} = sa, \\
 M_{s,h-1} = sb, h > 1 & \\
 & \sum_i (\text{Bin}_{i,h,sa} p_{\max_i} - \text{WTS}_{i,h,sa}) \geq \text{res}_r \text{dem}_{s,h} & \forall h, s, sa, M_{s,h} = sa \\
 & \text{CA\_AUX}_{i,h1,sa} \geq \text{ca}_i \text{Bin}_{i,h1,sa} & \forall i, s, sa, M_{s,h1} = sa \\
 & \text{WTS}_{i,h1,sa} \geq \text{rs}_i & \forall i, s, sa, M_{s,h1} = sa \\
 & \text{RH}_{j,h} \geq \text{res}_{\min_j} & \forall j, h \\
 & \text{RH}_{j,h} \leq \text{res}_{\max_j} & \forall j, h \\
 & \text{RH}_{j,h} = \text{RH}_{j,h-1} + \text{res}_{ini_{j,1}} + \text{ap}_{h,j} - \text{WH}_{j,h} + \text{VE}_{j,h} & \forall j, h \\
 & \text{WH}_{j,h} + \text{fluy}_j \leq \text{pmax\_turb}_j & \forall j, h
 \end{aligned}$$

## Resultados

- Mínimo coste de producción para el caso estocástico: 23757.35 €
- Valor del coste esperado con información perfecta: 23017.55€
- Valor de la información perfecta: 739.80 €
- Arrepentimiento medio: 739.80 €
- Máximo arrepentimiento: 1749.40 €

## Comentarios

Calculando el VSS obtenemos una diferencia de 1402.35€, entre la f.o. pr. estocástico y f.o. pr. determinista valores medios, una diferencia de aproximada de un 6%.

## Anexo: Código en GAMS

\*Grupo 8, sale bien

Option optcr = 0;

Sets

i grupos termicos /GAL, CAT, MAD, VAL, EXT-AND, CASTL/

j grupos hidraulicos /Tajo, Duero, Sil/

h horarios /h1, h2, h3, h4/

s escenarios /s1, s2, s3, s4/

alias(s,sa,sb)

;

Parameters

p\_max(i) Potencia maxima de cada termico [MW]

/GAL 400, CAT 500, MAD 700, VAL 400,

EXT-AND 900, CASTL 800/

p\_min(i) Potencia minima de cada termico [MW]

/GAL 100, CAT 150, MAD 150, VAL 50,

EXT-AND 450, CASTL 200 /

rs(i) Rampa de subida [Mw por hora]

/GAL 200, CAT 300, MAD 500,

VAL 300, EXT-AND 600, CASTL 400/

rb(i) Rampa de bajada [Mw por hora]

/GAL 300, CAT 300, MAD 200,

VAL 100, EXT-AND 600, CASTL 400/

ca(i) Coste de arranque [ $\hat{a}$ , -]

/GAL 10, CAT 20, MAD 10, VAL 15,

EXT-AND 20, CASTL 15/

cp(i) Coste de parada [ $\hat{a}$ , -]

/GAL 5, CAT 10, MAD 5, VAL 10,

EXT-AND 15, CASTL 10/

\*Aproximacion lineal del coste

a(i) Termino independiente [ $\hat{a}$ , -]

/GAL 50, CAT 30, MAD 30, VAL 25,

EXT-AND 80, CASTL 70/

b(i) Termino lineal de produccion (Coste unitario) [ $\hat{a}$ , -\MWh]

/GAL 4, CAT 5, MAD 4.2, VAL 4.5,

EXT-AND 2, CASTL 3/

\*Aproximaci3n cuadr3tica del coste

g(i) Termino independiente [ $\hat{a}$ , -]

/GAL 400, CAT 450, MAD 500, VAL 200,

EXT-AND 600, CASTL 1000/

z(i) Termino lineal de produccion [ $\hat{a}$ , -\MWh]

/GAL 0.25, CAT 0.2, MAD 0.2, VAL 0.01,

EXT-AND 0.1, CASTL 0.2/

c(i) Termino cuadratico [ $\hat{a}$ , -\MWh<sup>2</sup>]

/ GAL 0.007, CAT 0.006, MAD 0.0045, VAL 0.009,

EXT-AND 0.0015, CASTL 0.002/

\*Demanda horaria

dem(h) Demanda horaria caso determinista [MW]

/h1 2500 , h2 2800 , h3 3900 , h4 3000/

\*Grupos Hidraulicos

coef\_u(j) coeficiente u [MW]

/Tajo 1315, Duero 2138, Sil 816/

coef\_v(j) coeficiente v

/Tajo 0, Duero 0, Sil 0/

pmax\_turb(j) Potencia maxima de cada turbina [MW]

/Tajo 700, Duero 1500, Sil 600/

res\_max(j) Reserva maxima [Mwh]

/Tajo 4180000, Duero 6790000, Sil 2600000/

res\_min(j) Reserva minima [Mwh]

/Tajo 4179000, Duero 6789000, Sil 2598000/

res\_ini(j) Reserva inicial [Mwh]

/Tajo 4179000, Duero 6789000, Sil 2599000/

fluy(j) Fluyente [Mw]

/Tajo 160, Duero 440, Sil 200/

ap1(j) Aportaciones hora 1 [Mwh]

/Tajo 190, Duero 500, Sil 220/

ap2(j) Aportaciones hora 2 [Mwh]

/Tajo 200, Duero 550, Sil 250/

ap3(j) Aportaciones hora 3 [Mwh]

/Tajo 250, Duero 600, Sil 300/

ap4(j) Aportaciones hora 4 [Mwh]

/Tajo 180, Duero 470, Sil 200/

prob(s) probabilidad escenario s

/s1 0.36, s2 0.24, s3 0.24, s4 0.16/

vescen(s) valor obtenido en la solución estocástica en cada escenario

infperf(s) valor con información perfecta para escenario s

arrep(s) arrepentimiento del escenario s

vespinfperf valor esperado con información perfecta

vdeinfperf valor de la información perfecta

arrepmedio arrepentimiento medio

maxarrep máximo arrepentimiento

vss

Table M(s,h) matriz de escenarios

	h1	h2	h3	h4
s1	1	1	1	1
s2	1	1	1	2
s3	1	1	3	3



s4      1      1      3      4

;

Table dem\_s(s,h) demanda horaria caso estocástico

	h1	h2	h3	h4
s1	2500	2800	4680	3600
s2	2500	2800	4680	2100
s3	2500	2800	2730	3600
s4	2500	2800	2730	2100

;

Table

ap(h,j) aportaciones grupo hidraulico j en hora h

	Tajo	Duero	Sil
h1	190	500	220
h2	200	550	250
h3	250	600	300
h4	180	470	200

;

Scalar res\_r reserva rodante minima /0.2/

;

Variables

WT(i,h)      potencia grupo termico i en la hora h  
WH(j,h)      potencia grupo hidraulico j en la hora h  
RH(j,h)      reserva del grupo j al final de la hora h  
VE(j,h)      vertidos del grupo j en la hora h  
Bin(i,h)      vale 1 si el grupo termico i esta acoplado en la hora h  
z1            valor objetivo 1

z2            valor objetivo 2

lambda(h)   precio de la energia en la hora h

z3            valor objetivo 3

Ca\_aux(i,h) coste arranque aux

Cp\_aux(i,h) coste parada aux

z4            valor objetivo 4

zvmcd        valor medio objetivo 4

Z\_est        minimo coste de producción para el caso estocástico

BinS(i,h,s) vale 1 si el grupo termico i esta acoplado en la hora h en el escenario s

WTS(i,h,s) potencia de cada grupo termico en cada hora y cada escenario

WHS(j,h,s) potencia de cada grupo hidraulico en cada hora y cada escenario

RHS(j,h,s) reserva del grupo j al final de la hora h en el escenario s

VES(j,h,s) vertidos del grupo j en la hora h en el escenario s

CP\_AUXS(i,h,s) coste de parada de cada grupo en cada hora y cada escenario

CA\_AUXS(i,h,s) coste de arranque de cada grupo en cada hora y cada escenario

;

positive variables WT, WH, RH, VE, lambda, Ca\_aux, Cp\_aux, WTS, WHS, CP\_AUXS,  
CA\_AUXS;  
binary variable Bin, BinS;

#### Equations

fobj1            funcion objetivo del modelo 1

fobj2            funcion objetivo del modelo 2  
minmax(i,h)      lambda es el mayor de los costes

fobj3            funcion objetivo del modelo 3  
coste\_par(i,h)    coste parada  
coste\_arr(i,h)    coste arranque

fobj4            funcion objetivo del modelo 4  
rodante(h)       reserva rodante

demanda(h)      demanda minima  
subida(i,h)      rampa subida  
bajada(i,h)      rampa bajada  
infres(j,h)      cota inferior reserva  
supres(j,h)      cota superior reserva  
reserva(j,h)      reserva rodante  
ecofriendly(j,h) fluyente  
potmax(i,h)      potencia maxima  
potmin(i,h)      potencia minima

fobjmedio  
demandamedia

f\_obj5           función objetivo del modelo 5  
lim\_sup\_est      límite superior de la potencia para el caso estocástico  
lim\_inf\_est      límite inferior de la potencia para el caso estocástico  
demanda\_est      suma de potencias igual a la demanda para el caso estocástico  
coste\_par\_est    cálculo del coste de parada para el caso estocástico  
coste\_arr\_est    cálculo del coste de arranque para el caso estocástico  
rampa\_sup\_est   potencia limitada por rampa de subida para el caso estocástico  
rampa\_inf\_est    potencia limitada por rampa de bajada para el caso estocástico  
reserva\_rod\_est potencia limitada por la reserva rodante para el caso estocástico  
rest1            cálculo del coste de arranque en la primera hora  
rest2            potencia limitada por rampa de subida en la primera hora  
infres\_est      cota inferior reserva  
supres\_est      cota superior reserva  
reserva\_est      reserva rodante  
ecofriendly\_est fluyente  
;

fobj1..           z1 =E= sum((i,h), b(i)\*WT(i,h));

fobj2..           z2 =E= sum(h,lambda(h)\*dem(h));  
minmax(i,h)..    lambda(h) =G= b(i)\*Bin(i,h);

fobj3..           z3 =e= sum((i,h),g(i)\*Bin(i,h) + z(i)\*WT(i,h) + c(i)\*WT(i,h)\*WT(i,h) + Ca\_aux(i,h)  
+ Cp\_aux(i,h));  
coste\_par(i,h).. CP\_AUX(i,h) =g= cp(i)\*(Bin(i,h-1) - Bin(i,h));  
coste\_arr(i,h).. CA\_AUX(i,h) =g= -ca(i)\*(Bin(i,h-1) - Bin(i,h));

fobj4..           z4 =E= sum((i,h), a(i)\*Bin(i,h) + b(i)\*WT(i,h) + Ca\_aux(i,h) + Cp\_aux(i,h));  
rodante(h)..      sum(i, p\_max(i)\*Bin(i,h) - WT(i,h)) =G= dem(h)\*res\_r;

```

demanda(h)..      sum(i, WT(i,h)) + sum(j, WH(j,h)) =E= dem(h);
subida(i,h)..     WT(i,h) - WT(i,h-1) =L= rs(i);
bajada(i,h)..     WT(i,h-1) - WT(i,h) =L= rb(i);
infres(j,h)..     RH(j,h) =G= res_min(j);
supres(j,h)..     RH(j,h) =L= res_max(j);
reserva(j,h)..    RH(j,h) =E= RH(j,h-1) + res_ini(j)*(ord(h)=1) + ap(h,j) - WH(j,h) - VE(j,h);
ecofriendly(j,h).. WH(j,h) + fluy(j) =L= pmax_turb(j);
potmax(i,h)..     WT(i,h) =L= p_max(i)*Bin(i,h);
potmin(i,h)..     WT(i,h) =G= p_min(i)*Bin(i,h);

fobjmedio..       zvmed =E= sum((i,h), a(i)*Bin(i,h) + b(i)*WT(i,h) + Ca_aux(i,h) + Cp_aux(i,h));
demandamedia(h).. sum(i, WT(i,h)) + sum(j, WH(j,h)) =E= sum(s,dem_s(s,h)*prob(s));

model uno /fobj1,demanda,subida,bajada,infres,supres,reserva,ecofriendly,potmax,potmin/;
solve uno using mip minimizing z1;
display z1.l,WT.l, WH.l, RH.l, VE.l, Bin.l ;

model dos
/fobj2,minmax,demanda,subida,bajada,infres,supres,reserva,ecofriendly,potmax,potmin/;
solve dos using mip minimizing z2;
display z2.l, lambda.l, WT.l, WH.l, RH.l, VE.l, Bin.l;

model tres
/fobj3,coste_par,coste_arr,demanda,subida,bajada,infres,supres,reserva,ecofriendly,potmax,potmin/;
solve tres using miqcp minimizing z3;
display z3.l, WT.l, WH.l, RH.l, VE.l, Bin.l;

model cuatro
/fobj4,coste_par,coste_arr,demanda,subida,bajada,infres,supres,reserva,ecofriendly,potmax,potmin,rodante/;
solve cuatro using mip minimizing z4;
display z4.l, WT.l, WH.l, RH.l, VE.l, Bin.l;

model valoresmedios
/fobjmedio,coste_par,coste_arr,rodante,demandamedia,subida,bajada,infres,supres,reserva,ecofriendly,potmax,potmin/;
solve valoresmedios using mip minimizing zvmed;
display zvmed.l, WT.l, WH.l, RH.l, VE.l, Bin.l;

*Estocastica
f_obj5 ..          Z_est =e= sum((i,h,s,sa)*(M(s,h)=ord(sa)),
prob(s)*(BinS(i,h,sa)*a(i)+WTS(i,h,sa)*b(i) + CA_AUXS(i,h,sa)+CP_AUXS(i,h,sa)));
lim_sup_est(i,h,s,sa)*(M(s,h)=ord(sa)) ..          WTS(i,h,sa) =l=
p_max(i)*BinS(i,h,sa);
lim_inf_est(i,h,s,sa)*(M(s,h)=ord(sa)) ..          WTS(i,h,sa) =g=
p_min(i)*BinS(i,h,sa);
demanda_est(h,s,sa)*(M(s,h)=ord(sa)) ..          sum(i, WTS(i,h,sa)) +
sum(j, WH(j,h)) =e= dem_s(s,h);
coste_par_est(i,h,s,sa,sb)*(M(s,h)=ord(sa) and M(s,h-1)=ord(sb) and ord(h)>1) ..
CP_AUXS(i,h,sa) =g= cp(i)*(BinS(i,h-1,sb)-BinS(i,h,sa));
coste_arr_est(i,h,s,sa,sb)*(M(s,h)=ord(sa) and M(s,h-1)=ord(sb) and ord(h)>1) ..
CA_AUXS(i,h,sa) =g= -ca(i)*(BinS(i,h-1,sb)-BinS(i,h,sa));
rampa_sup_est(i,h,s,sa,sb)*(M(s,h)=ord(sa) and M(s,h-1)=ord(sb) and ord(h)>1) ..
WTS(i,h,sa) =l= WTS(i,h-1,sb) + rs(i);
rampa_inf_est(i,h,s,sa,sb)*(M(s,h)=ord(sa) and M(s,h-1)=ord(sb) and ord(h)>1) .. WTS(i,h,sa)
=g= WTS(i,h-1,sb) - rb(i);
reserva_rod_est(h,s,sa)*(M(s,h)=ord(sa)) ..          sum(i, BinS(i,h,sa)*p_max(i)
- WTS(i,h,sa)) =g= res_r*dem_s(s,h);

```

```

rest1(i,'h1',s,sa)$(M(s,'h1')=ord(sa)) ..          CA_AUXS(i,'h1',sa) =g=
ca(i)*BinS(i,'h1',sa);
rest2(i,'h1',s,sa)$(M(s,'h1')=ord(sa)) ..          WTS(i,'h1',sa) =l= rs(i);

Model cinco /f_obj5,lim_sup_est,lim_inf_est,demanda_est,rampa_sup_est,rampa_inf_est,
coste_par_est,coste_arr_est,reserva_rod_est,rest1,rest2,ecofriendly,
infres,supres,reserva/;
solve cinco using MIP minimizing Z_est;
display WTS.l, BinS.l, CA_AUXS.l, CP_AUXS.l, WH.l;
vss=z_est.l-(z1.l*prob('s1')+z2.l*prob('s2')+z3.l*prob('s3')+z4.l*prob('s4'))/4;
display Z_est.l,z1.l, z2.l, z3.l, z4.l,vss;

*valor obtenido por escenario
vescen(s)=sum((i,h,sa)$(M(s,h)=ord(sa)),          BinS.l(i,h,sa)*a(i)+WTS.l(i,h,sa)*b(i)      +
CA_AUXS.l(i,h,sa)+CP_AUXS.l(i,h,sa));
display vescen;

*cálculo de valor con información perfecta y arrepentimientos
loop(s,
dem(h)=dem_s(s,h);
SOLVE cuatro using MIP minimizing z4;
infperf(s)=z4.l;
arrep(s)=vescen(s)-z4.l;
display WH.l;
);

vespinfperf=sum(s, prob(s)*infperf(s));
vdeinfperf=Z_est.l-vespinfperf;
arrepmedio=sum(s, prob(s)*arrep(s));
maxarrep = smax(s, arrep(s));
vss=z_est.l - zvmed.l;

display Z_est.l, infperf, arrep, vespinfperf, vdeinfperf, arrepmedio, maxarrep,vss;

```