Taller de economatem´atica

Informe Coordinacion Hidrot ´ ermica ´ Grupo 10

Marzo 2022

Consideraremos el sistema hipot´etico y los modelos planteados en el problema.

*En todos los modelos ha de satisfacerse la demanda y la reserva rodante t´ermica horaria, y respetar los m´ınimos y m´aximos t´ecnicos de los grupos, as´ı como sus rampas de subida y de bajada, y en los grupos hidr´aulicos la potencia m´axima de turbinaci´on y la ecuaci´on de balance de las reservas, as´ı como sus limitaciones.*

Los ´ındices que vamos a utilizar a lo largo de todos los modelos son:

*t ∈ { GAL, CAT, MAD, V AL, EXT − AND, CAST L}* para los grupos t´ermicos *g ∈ {T ajo, Duero, Sil}* para los grupos hidroel´ectricos

*h ∈ {*1*,* 2*,* 3*,* 4*}* para cada hora

Los par´ametros que necesitaremos son:

*pmaxt*: Potencia m´axima de cada t´ermico [MW] /GAL 400, CAT 500, MAD 700, VAL 400, EXT-AND 900, CASTL 800/

*pmint*: Potencia m´ınima de cada t´ermico [MW] /GAL 100, CAT 150, MAD 150, VAL 50, EXT-AND 450, CASTL 200 /

*rst*: Rampa de subida [Mw por hora] /GAL 200, CAT 300, MAD 500, VAL 300, EXT-AND 600, CASTL 400/

*rbt*: Rampa de bajada [Mw por hora] /GAL 300, CAT 300, MAD 200, VAL 100, EXT-AND 600, CASTL 400/

*at*: T´ermino independiente [€] /GAL 50, CAT 30, MAD 30, VAL 25, EXT-AND 80, CASTL 70/

*bt*: T´ermino lineal de producci´on (Coste unitario) [€ por MWh] /GAL 4, CAT 5, MAD 4.2, VAL 4.5, EXT-AND 2, CASTL 3/

*dh*: Demanda por horas [MW] /1 2500 ,2 2800 ,3 3900 ,4 3000/

*pmaxturg*: potencia maxima [Mw] de la turbina del grupo hidraulico g /Tajo 700,Duero 1500,Sil 600/

1

Taller de economatem´atica

*rmaxg*: reserva maxima del grupo [Mw] hidraulico g /Tajo 4180000,Duero 6790000,Sil 2600000/

*rming*: reserva minima del [Mw] grupo hidraulico g /Tajo 4179000,Duero 6789000,Sil 2598000/

*RHIg*: reserva inicial [Mw] del grupo hidraulico g /Tajo 4179000,Duero 6789000,Sil 2599000/

*fg*: fluyente [Mw] del grupo hidraulico g /Tajo 160,Duero 440,Sil 200/

*T It*: T´ermino independiente [€] /GAL 400, CAT 450, MAD 500, VAL 200, EXT-AND 600, CASTL 1000/

*T Lt*: T´ermino lineal de producci´on [€ por MWh] /GAL 0.25, CAT 0.2, MAD 0.2, VAL 0.01, EXT-AND 0.1, CASTL 0.2/

*T Ct*: T´ermino cuadr´atico [€MWh2] / GAL 0.007, CAT 0.006, MAD 0.0045, VAL 0.009, EXT-AND 0.0015, CASTL 0.002/

*cat*: Coste de arranque [€] /GAL 10, CAT 20, MAD 10, VAL 15, EXT-AND 20, CASTL 15/

*cpt*: Coste de parada [€] /GAL 5, CAT 10, MAD 5, VAL 10, EXT-AND 15, CASTL 10/

*Modelo 1: Minimizar los costes de producci´on considerando exclusivamente el t´ermino lineal (coste unitario) de la aproximaci´on lineal bi. Dar la programaci´on horaria de los grupos, los que est´an acoplados cada hora, y la generaci´on hidr´aulica horaria.*

*P Tth P Hgh Y* 1*th RHgh Vgh* Las variables que necesitamos para este modelo son:

*P Tth*: variable positiva que determina la producci´on en MW del grupo t´ermico *t* la hora *h*,

*P Hgh*: variable positiva que determina la producci´on en MW del grupo hidr´aulico *g* la hora *h*,

*Y* 1*th*: variable binaria que determina si el grupo t´ermico *t* est´a acoplado a la hora *h*, *RHgh*: variable positiva que determina la reserva en Mwh del grupo *g* la hora *h*, *Vgh*: vertido en Mwh del grupo *g* la hora *h*.

2

Taller de economatem´atica

A este modelo le corresponde la siguiente funci´on objetivo:

*M in* :X

*h*

y las siguientes familias de restricciones:

X *t*

*bt · P Tth*

1.X *t*

*P Tth* +X *g*

*P Hgh* = *dh ∀h*

que garantiza que se produzca exactamente la demanda para cada hora,

2.

*P Tth ≤ pmaxt · Y* 1*th ∀h, t*

que limita superiormente la potencia de cada grupo t´ermico cada hora,

3.

*pmint · Y* 1*th ≤ P Tth ∀h, t*

que limita inferiormente la potencia de cada grupo t´ermico cada hora,

4.

*P Tth − P Tth−*1 *≤ rst ∀h, t*

que garantiza que se cumpla la rampa m´axima de subida de cada grupo t´ermico cada hora,

5.

*P Tth−*1 *− P Tth ≤ rbt ∀h, t*

que garantiza que se cumpla la rampa m´axima de bajada de cada grupo t´ermico cada hora,

6.

*P Hgh* + *fg ≤ pmaxturg ∀h, g*

que tiene en cuenta la capacidad m´axima de las turbinas de cada grupo hidr´aulico en cada hora,

7.

*RHgh ≤ rmaxg ∀h, g*

que determina la m´axima reserva de cada grupo hidr´aulico en cada hora, 3

Taller de economatem´atica

8.

*rming ≤ RHgh ∀h, g*

que determina la m´ınima reserva de cada grupo hidr´aulico en cada hora,

9.

*RHg*1 = *RHIg − P Hg*1 + *aporg*1 *− Vg*1 *∀g*

*RHgh* = *RHgh−*1 *− P Hgh* + *aporhg − Vgh ∀g, h*

la ecuaci´on de balance para la primera hora y para las dem´as, as´ı como

10.X *t*

(*pmaxt · Y* 1*th − P Tth*) *≥* 0*,*2 *· dh ∀h*

que garantiza que se cumpla la reserva rodante.

El coste eligiendo la disposici´on ´optima de los grupos asciende a 21380.00€. Para ello, cada grupo t´ermico deber´a producir la siguiente cantidad de MW en las horas indicadas.

| Generaci´on t´ermica modelo 1 | | | | |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Hora | Hora 1 | Hora 2 | Hora 3 | Hora 4 |
| GAL  CAT  MAD  VAL  EXT-AND  CASTL | 200.0000  0  250.0000  0  600.0000  400.0000 | 390.0000  0  150.0000  0  900.0000  800.0000 | 170.0000  0  150.0000  0  900.0000  800.0000 | 100.0000  0  150.0000  0  900.0000  800.0000 |

Las centrales hidroel´ectricas deber´an producir los MW que indica la siguiente tabla:

| Generaci´on hidr´aulica modelo 1 | | | | |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Hora | Hora 1 | Hora 2 | Hora 3 | Hora 4 |
| Tajo  Duero  Sil | 190.0000  460.0000  400.0000 | 30.0000  130.0000  400.0000 | 420.0000  1060.0000  400.0000 | 180.0000  470.0000  400.0000 |

4

Taller de economatem´atica

*Modelo 2: Asumiendo los costes de producci´on exclusivamente el t´ermino lineal de la aproximaci´on lineal, pero el operador ha de comprar a un precio ´unico unitario pagando a todos el m´aximo del coste unitario de los grupos que est´an generando esa hora, minimizar el pago por la energ´ıa. Dar la programaci´on horaria de los grupos, los que est´an acoplados cada hora, la generaci´on hidr´aulica horaria y el precio horario.*

Para este modelo tenemos que introducir las siguientes variables:

*casah*: precio de casaci´on en € de la hora *h*.

A este modelo le corresponde la siguiente funci´on objetivo:

*M in* :X *h*

*dh · casah*

y habr´ıa que a˜nadir las siguientes restricciones sobre *h* a las del *Modelo 1* :

*casah ≥ bt · Y* 1*th ∀t*

que determinar´a para cada hora *h* el precio de casaci´on como el m´aximo precio de los grupos t´ermicos acoplados.

Ahora, la funci´on objetivo toma un valor de 50400.00€ . Se observa que este valor es considerablemente superior al del *Modelo 1*. Esto se debe a que ahora todos los MW se pagan al precio de la energ´ıa m´as cara, el precio de casaci´on. De hecho, este modelo es el de mayor coste. Para este coste, la producci´on de cada grupo t´ermico deber´a ser la siguiente en MW en las horas indicadas.

| Generaci´on t´ermica modelo 2 | | | | |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Hora | Hora 1 | Hora 2 | Hora 3 | Hora 4 |
| GAL  CAT  MAD  VAL  EXT-AND  CASTL | 200.0000  0  500.0000  300.0000  600.0000  400.0000 | 400.0000  0  400.0000  200.0000  900.0000  500.0000 | 300.0000  0  200.0000  200.0000  900.0000  660.0000 | 0  0  0  0  840.0000  260.0000 |

5

Taller de economatem´atica

Las centrales hidroel´ectricas deber´an producir lo que indica la siguiente tabla:

| Generaci´on hidr´aulica modelo 2 | | | | |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Hora | Hora 1 | Hora 2 | Hora 3 | Hora 4 |
| Tajo  Duero  Sil | 0  100.0000  400.0000 | 0  0  400.0000 | 280.0000  1060.0000  400.0000 | 540.0000  960.0000  400.0000 |

La disposici´on ´optima de los grupos en este modelo es completamente diferente a la anterior. En el *Modelo 1* no hay costes asociados a los grupos hidr´aulicos, y por lo tanto estos grupos estaban acoplados siempre. En este modelo se pagan todas las energ´ıas al mismo precio, resultando en un menor consumo de energ´ıas hidroel´ectricas en las 3 primeras horas, y en un mayor consumo de estas en la ´ultima hora.

*Modelo 3: Minimizar los costes de producci´on considerando la aproximaci´on cuadr´atica e incluyendo costes de arranque y parada. Dar la programaci´on horaria de los grupos, los que est´an acoplados cada hora, la generaci´on hidr´aulica horaria y los que arrancan y paran cada hora.*

Para este modelo tenemos que introducir las siguientes variables:

*P arth*: variable binaria que determina si se desacopla el grupo t´ermico *t* en la hora *h*. *Arrth*: variable binaria que determina si se acopla el grupo t´ermico *t* en la hora *h*. A este modelo le corresponde la siguiente funci´on objetivo:

*M in* :X *h*

X

*T Ct · P Tth · P Tth* + *T Lt · P Tth* + *T It · Y* 1*th* + *Arrth · catt* + *P arth · cpt t*

y habr´ıa que a˜nadir las siguientes restricciones a las del modelo anterior: *Y* 1*th − Y* 1*th−*1 = *Arrth − P arth ∀t, h*

que determina cuando arranca o para cada grupo t´ermico. 6

Taller de economatem´atica

La funci´on objetivo ahora toma un valor de 20417.50€. Para ello, cada grupo t´ermico deber´a producir la siguiente cantidad de MW en las horas indicadas.

| Generaci´on t´ermica modelo 3 | | | | |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Hora | Hora 1 | Hora 2 | Hora 3 | Hora 4 |
| GAL  CAT  MAD  VAL  EXT-AND  CASTL | 0  0  336.9312  179.0212  600.0000  400.0000 | 0  0  336.9312  179.0212  900.0000  758.0952 | 0  0  295.8519  158.4815  900.0000  665.6667 | 0  0  282.3868  151.7490  880.4938  635.3704 |

Las centrales hidroel´ectricas deber´an producir lo que indica la siguiente tabla:

| Generaci´on hidr´aulica modelo 3 | | | | |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Hora | Hora 1 | Hora 2 | Hora 3 | Hora 4 |
| Tajo  Duero  Sil | 100.0000  484.0476  400.0000 | 0  225.9524  400.0000 | 540.0000  940.0000  400.0000 | 180.0000  470.0000  400.0000 |

Este modelo incluye los costes de arranque y de parada, luego es esperable que no se acoplen o desacoplen muchos grupos t´ermicos. En efecto, la soluci´on que obtenemos mantiene las los grupos *GAL* Y *CAT* desacoplados las 4 horas, mientras que el resto de grupos t´erminos est´an acoplados siempre.

*Modelo 4: Minimizar los costes de producci´on considerando la aproximaci´on lineal e incluyendo costes de arranque y parada. Dar la programaci´on horaria de los grupos, los que est´an acoplados cada hora, los que arrancan y paran cada hora y la generaci´on hidr´aulica horaria.*

En este modelo utilizaremos las mismas variables y restricciones que en el *Modelo 3*, pero usaremos la siguiente aproximaci´on lineal en la funci´on objetivo.

*obj* =X *h*

X *t*

*bt · P Hth* + *at · Y* 1*th* + *Arrth · cat* + *P arth · cpt .*

La funci´on objetivo toma un valor de 22355.00€ . La aproximaci´on (lineal) de costes utilizada en este modelo es menos precisa que la que se utiliza en el modelo anterior (cuadr´atica), sin embargo el modelo se resuelve m´as r´apido. Para llegar al coste ´optimo,

7

Taller de economatem´atica

cada grupo t´ermico deber´a producir la siguiente cantidad de MW en las horas indicadas.

| Generaci´on t´ermica modelo 4 | | | | |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Hora | Hora 1 | Hora 2 | Hora 3 | Hora 4 |
| GAL  CAT  MAD  VAL  EXT-AND  CASTL | 200.0000  0  250.0000  0  600.0000  400.0000 | 390.0000  0  150.0000  0  900.0000  800.0000 | 170.0000  0  150.0000  0  900.0000  800.0000 | 100.0000  0  150.0000  0  900.0000  800.0000 |

Las centrales hidroel´ectricas deber´an producir lo que indica la siguiente tabla:

| Generaci´on hidr´aulica modelo 4 | | | | |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Hora | Hora 1 | Hora 2 | Hora 3 | Hora 4 |
| Tajo  Duero  Sil | 190.0000  460.0000  400.0000 | 30.0000  130.0000  400.0000 | 420.0000  1060.0000  400.0000 | 180.0000  470.0000  400.0000 |

Estos valores son los mismos que los obtenidos en el apartado 1. En este caso, tener en cuenta los costes de arranque y de parada, con esta aproximaci´on lineal, no influye en la pol´ıtica ´optima.

*Modelo 5: Minimizar los costes de producci´on considerando la aproximaci´on lineal e incluyendo costes de arranque y parada, si fuera un ciclo cerrado en los grupos t´ermicos (empiezan como terminan). Dar la programaci´on horaria de los grupos, los que est´an acoplados cada hora, los que arrancan y paran cada hora y la generaci´on hidr´aulica horaria.*

Este modelo se formula igual que el Modelo 4, con la salvedad de que hay que a˜nadir las restricciones:

*P Tt*0 = *P Tt*4 *∀t*

que significa que empezamos y terminamos con la misma producci´on cada ciclo. La funci´on objetivo toma un valor de 21205.00 €. El coste aumenta con respecto al modelo anterior porque tenemos menos pol´ıticas posibles, al haber introducido la nueva restricci´on. Para llegar a este coste ´optimo, cada grupo t´ermico deber´a producir la siguiente cantidad de MW en las horas indicadas.

8

Taller de economatem´atica

| Generaci´on t´ermica modelo 5 | | | | |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Hora | Hora 1 | Hora 2 | Hora 3 | Hora 4 |
| GAL  CAT  MAD  VAL  EXT-AND  CASTL | 0  0  150.0000  0  900.0000  800.0000 | 0  0  150.0000  0  900.0000  790.0000 | 170.0000  0  150.0000  0  900.0000  800.0000 | 100.0000  0  150.0000  0  900.0000  800.0000 |

Las centrales hidroel´ectricas deber´an producir lo que indica la siguiente tabla:

| Generaci´on hidr´aulica modelo 5 | | | | |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Hora | Hora 1 | Hora 2 | Hora 3 | Hora 4 |
| Tajo  Duero  Sil | 0  250.0000  400.0000 | 220.0000  340.0000  400.0000 | 420.0000  1060.0000  400.0000 | 180.0000  470.0000  400.0000 |

*Modelo 6: Minimizar los costes de producci´on esperados considerando la aproximaci´on lineal e incluyendo costes de arranque y parada (con ciclo abierto, como modelo 4), si hay incertidumbre sobre la demanda de las horas futuras, de modo que:*

*• En la primera hora y en la segunda hora la demanda es conocida (el dato dado) • En la tercera hora, puede ser un 10 % m´as del dato dado con probabilidad 0,6 y un 15 % menos del dato dado con probabilidad 0,4*

*• En la cuarta hora, puede ser un 10 % m´as del dato dado con probabilidad 0,6 y un 15 % menos del dato dado con probabilidad 0,4*

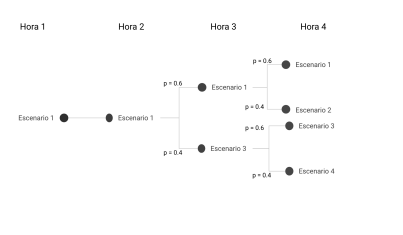
*Dar la programaci´on que optimiza el coste esperado de la generaci´on (seg´un el escenario), el valor de la soluci´on estoc´astica, el valor esperado con informaci´on perfecta y el valor esperado de la informaci´on perfecta.*

*Opcional: Dar la programaci´on que minimiza el m´aximo arrepentimiento y comparar* Se plantea el problema de optimizar el coste esperado de la generaci´on, teniendo en cuenta que la demanda podr´a recorrer cuatro caminos posibles. Para ello, tomaremos el *Modelo 4* y lo resolveremos utilizando los datos de los cuatro escenarios posibles. A partir de estos resultados calcularemos el valor esperado con informaci´on perfecta. Para el problema estoc´astico, reformularemos la funci´on objetivo y crearemos nuevas variables que dependan de los escenarios.

La siguiente imagen representa los diferentes escenarios posibles que deber´a recoger nuestro 9

Taller de economatem´atica

modelo.



Para resolver el modelo determinista, creamos un bucle que recorra los 4 posibles escenarios finales. En cada iteraci´on, la demanda cambiar´a por la correspondiente a dicho escenario. El resto de par´ametros y las variables son las mismas que en el *Modelo 4.* Los resultados han sido:

Para el primer escenario, la funci´on objetivo toma un valor de 24120 € . La programaci´on horaria para los grupos t´ermicos es la siguiente:

| Generaci´on t´ermica escenario 1 | | | | |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Hora | Hora 1 | Hora 2 | Hora 3 | Hora 4 |
| GAL  CAT  MAD  VAL  EXT-AND  CASTL | 200.0000  0  428.0000  0  600.0000  400.0000 | 312.0000  0  228.0000  0  900.0000  800.0000 | 400.0000  0  192.0000  50.0000  900.0000  800.0000 | 290.0000  0  150.0000  0  900.0000  800.0000 |

La producci´on de las centrales hidroel´ectricas ser´a la siguiente:

10

Taller de economatem´atica

| Generaci´on hidr´aulica escenario 1 | | | | |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Hora | Hora 1 | Hora 2 | Hora 3 | Hora 4 |
| Tajo  Duero  Sil | 42.0000  430.0000  400.0000 | 0  160.0000  400.0000 | 5488.0000  1060.0000  400.0000 | 290.0000  470.0000  400.0000 |

La demanda de este escenario es superior que la demanda del *Modelo 4* en las horas 3 y 4, por lo tanto, el coste asociado a este escenario tambi´en es superior.

Para el segundo escenario, el valor de la funci´on objetivo es de 22438 €. A continuaci´on se muestra la programaci´on horaria correspondiente:

| Generaci´on t´ermica escenario 2 | | | | |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Hora | Hora 1 | Hora 2 | Hora 3 | Hora 4 |
| GAL  CAT  MAD  VAL  EXT-AND  CASTL | 20.0000  0  370.0000  0  600.0000  400.0000 | 0  0  170.0000  0  900.0000  800.0000 | 370.0000  0  200.0000  90.0000  900.0000  800.0000 | 300.0000  0  0  50.0000  900.0000  550.0000 |

La producci´on de las centrales hidroel´ectricas ser´a la siguiente:

| Generaci´on hidr´aulica escenario 2 | | | | |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Hora | Hora 1 | Hora 2 | Hora 3 | Hora 4 |
| Tajo  Duero  Sil | 100.0000  430.0000  400.0000 | 0  160.0000  400.0000 | 540.0000  1060.0000  400.0000 | 180.0000  470.0000  400.0000 |

Para el tercer escenario, el valor de la funci´on objetivo es de 21182 €. A continuaci´on se muestra la programaci´on horaria correspondiente:

11

Taller de economatem´atica

| Generaci´on t´ermica escenario 3 | | | | |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Hora | Hora 1 | Hora 2 | Hora 3 | Hora 4 |
| GAL  CAT  MAD  VAL  EXT-AND  CASTL | 200.0000  0  210.0000  0  600.0000  400.0000 | 0  0  150.0000  0  900.0000  790.0000 | 135.0000  0  150.0000  0  900.0000  800.0000 | 290.0000  0  150.0000  0  900.0000  800.0000 |

La producci´on de las centrales hidroel´ectricas ser´a la siguiente:

| Generaci´on hidr´aulica escenario 3 | | | | |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Hora | Hora 1 | Hora 2 | Hora 3 | Hora 4 |
| Tajo  Duero  Sil | 190.0000  500.0000  400.0000 | 10.0000  550.0000  400.0000 | 440.0000  490.0000  400.0000 | 180.0000  580.0000  400.0000 |

Para el tercer escenario, el valor de la funci´on objetivo es de 18507 €. A continuaci´on se muestra la programaci´on horaria correspondiente:

| Generaci´on t´ermica escenario 4 | | | | |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Hora | Hora 1 | Hora 2 | Hora 3 | Hora 4 |
| GAL  CAT  MAD  VAL  EXT-AND  CASTL | 200.0000  0  210.0000  0  600.0000  400.0000 | 0  0  150.0000  0  900.0000  790.0000 | 0  0  150.0000  50.0000  900.0000  800.0000 | 0  0  0  50.0000  900.0000  525.0000 |

La producci´on de las centrales hidroel´ectricas ser´a la siguiente:

| Generaci´on hidr´aulica escenario 4 | | | | |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Hora | Hora 1 | Hora 2 | Hora 3 | Hora 4 |
| Tajo  Duero  Sil | 190.0000  500.0000  400.0000 | 200.0000  360.0000  400.0000 | 225.0000  790.0000  400.0000 | 205.0000  470.0000  400.0000 |

Se puede apreciar que aunque la demanda para las dos primeras horas es la misma en todos los escenarios, la programaci´on cambia en esas horas seg´un el escenario en que nos

12

Taller de economatem´atica

encontremos, adapt´andose a esos futuros cambios.

El modelo estoc´astico que vamos a resolver ahora plantea precisamente esto, qu´e decisiones tomar en las primeras dos horas de manera que se minimice el coste esperado. Para ello, tendremos que tomar como funci´on objetivo la esperanza de la funci´on objetivo definida en el *Modelo 4*.

*obj* =X *h*

X *t*

*bt · P Hth* + *at · Y* 1*th* + *Arrth · cat* + *P arth · cpt .*

Se puede ver que ahora vamos a necesitar que las variables dependan tambi´en del escenario en que estemos. Por lo tanto, necesitamos redefinir las variables que ten´ıamos en el modelo anterior de la siguiente manera:

*EP Tsth, EP Hsgh, EY* 1*sth, ERHsgh, EVsgh, EP arsth, EArrsth, Ecasash* d´onde el ´ındice *s ∈ {*1*,* 2*,* 3*,* 4*}* representa los diferentes escenarios. Introduciremos tambi´en *s*2, un alias de este ´ındice ya que lo necesitaremos para las restricciones del modelo. Las variables son las mismas que las del Modelo 4, pero precedidas por una *E* (estoc´asticas) en el nombre y con un ´ındice extra que representa los diferentes escenarios. Adem´as habr´a que introducir el siguiente par´ametro

*Psh*:La probabilidad de que ocurra el escenario *s* en la hora *h*.

y cambiaremos *dh* (el par´ametro que representaba la demanda de cada hora) por *DEMsh*, ya que tambi´en depender´a del escenario. El resto de par´ametros no dependen del escenario, por lo tanto siguen siendo los mismos que antes.

La funci´on objetivo quedar´ıa de la siguiente manera:

*obj* =X *h*

X *t*

X *s∈Sh*

*Psh ·* (*bt · EP Hsth* + *at · EY* 1*sth* + *EArrsth · cat* + *EP arsth · cpt*) *.*

donde *Sh* son los siguientes conjuntos: *S*1 = *{*1*} S*2 = *{*1*} S*3 = *{*1*,* 3*} S*4 = *{*1*,* 2*,* 3*,* 4*}* Para programarlo en GAMS, introdujimos la siguiente matriz:

*LUCIsh* =



1 1 1 1

1 1 1 2 1 1 3 3 1 1 3 4

 

de forma que la funci´on objetivo quedar´ıa de la siguiente manera:

*obj* =X *h*

X *t*

X

*s*=*LUCI*(*s,h*)

*Psh·*(*bt ·EP Hsth*+*at ·EY* 1*sth*+*EArrsth·cat*+*EP arsth·cpt*) *.*

La condici´on *s* = *LUCI*(*s, h*) con la matriz definida de la forma anterior, nos ayuda a utilizar 13

Taller de economatem´atica

´unicamente las variables de los escenarios posibles. Es decir, en las dos primeras horas tenemos un ´unico escenario posible y por lo tanto tendremos una ´unica variable *EP H*1*th* que represente la energ´ıa producida por la central *t* en la hora *h*. En la tercera hora, habr´a dos variables, una por cada escenario posible, y en la cuarta habr´a cuatro. A continuaci´on describiremos las restricciones que utilizaremos, que son las mismas que el *Modelo 4* pero con las nuevas variables.

1.X *t*

*EP Tths* +X *g*

*EP Hghs* = *DEMh ∀h, s|s* = *LUCIsh*

que garantiza que se produzca exactamente la demanda para cada hora en cada escenario posible,

2.

*EP Tths ≤ pmaxt · EY* 1*ths ∀h, t, s|s* = *LUCIsh*

que limita superiormente la potencia de cada grupo t´ermico cada hora en cada escenario posible,

3.

*pmint · EY* 1*ths ≤ EP Tths ∀h, t, s|s* = *LUCIsh*

que limita inferiormente la potencia de cada grupo t´ermico cada hora en cada escenario posible,

4.

*EP Tths − EP Tth−*1*s*2 *≤ rst ∀t, h|h ̸*= 1*, s|s* = *LUCIsh, s*2*|s*2 = *LUCIsh−*1

*EP Tt*1*s ≤ rst ∀t, s|s* = *LUCIs*1*,*

que garantiza que se cumpla la rampa m´axima de subida de cada grupo t´ermico cada hora y en cada escenario factible1,

5.

*EP Tth−*1*s*2 *− EP Tths ≤ rbt ∀t, h|h ̸*= 1*, s|s* = *LUCIsh, s*2*|s*2 = *LUCIsh−*1

que garantiza que se cumpla la rampa m´axima de bajada de cada grupo t´ermico cada hora en cada escenario posible,

1el ´ındice s2 cumple una condici´on que garantiza que es escenario anterior a s

14

Taller de economatem´atica

6.

*EP Hghs* + *fg ≤ pmaxturg ∀h, g, s|s* = *LUCIsh*

que tiene en cuenta la capacidad m´axima de las turbinas de cada grupo hidr´aulico en cada hora en cada escenario posible,

7.

*ERHghs ≤ rmaxg ∀h, g, s|s* = *LUCIsh*

que determina la m´axima reserva de cada grupo hidr´aulico en cada hora en cada escenario posible,

8.

*rming ≤ RHghs ∀h, g, s|s* = *LUCIsh*

que determina la m´ınima reserva de cada grupo hidr´aulico en cada hora en cada escenario posible,

9.

*ERHg*1 = *RHIg − EP Hg*1*s* + *aporg*1 *− EVg*1*s ∀g, s|s* = *LUCIs*1 *ERHghs* = *RHgh−*1 *− EP Hghs* + *aporhg − EVghs ∀g, h >* 1*, s|s* = *LUCIsh*

la ecuaci´on de balance en cada escenario posible para la primera hora y para las dem´as, as´ı como

10.X *t*

(*pmaxt · EY* 1*ths − EP Tths*) *≥* 0*,*2 *· DEMhs ∀h*

que garantiza que se cumpla la reserva rodante, y por ´ultimo

11.

*Y* 1*ths−Y* 1*th−*1*s*2 = *Arrths−P arths ∀t, h|h ̸*= 1*, s|s* = *LUCIsh, s*2*|s*2 = *LUCIsh−*1

*Y* 1*t*1*s* = *Arrt*1*s − P art*1*s ∀t, s|s* = *LUCIsh*

la condici´on de arranque y parada.

La resoluci´on de este modelo nos lleva a que el valor de la funci´on objetivo es 22622.2880 €. Este coste es mayor al coste del *Modelo 4*, que era 22355.00€. Este resultado es esperable ya que el modelo que tenemos ahora no es determinista, y desconocemos cual ser´a la demanda en algunas etapas, por lo que se prescribe una programaci´on m´as flexible que se adapte a los escenarios que puedan suceder.

15

Taller de economatem´atica

El valor esperado con informaci´on perfecta es la media ponderada de los valores que ha tomado la funci´on objetivo en funci´on de la probabilidad de que ocurra cada escenario.

Valor esperado con informaci´on perfecta = 0*,*36*·*25249*,*6+0*,*24*·*22438+0*,*24*·*21182+0*,*16*·*18407 = *patatan*

El valor de informaci´on perfecta es la diferencia entre el valor objetivo del modelo estoc´astico y el valor con informaci´on perfecta.

valor de informaci´on perfecta = 22622*,*288 *− patatan* = *patatatatan*

CONCLUSIONES

Como patatatatan es muy peque˜no, el modelo estoc´astico se adapta satisfactoriamente a los distintos escenarios teniendo en cuenta la variabilidad de las demandas y del coste entre los escenarios. Por tanto es recomendable usarlo.

16

Taller de economatem´atica

Adjuntamos el c´odigo de gams empleado para resolver los modelos:

$TITLE \*\*\*\* Grupo 10 Coordinacion Hidrotermica \*\*\*\*

sets

t termicas /GAL, CAT, MAD, VAL, EXT-AND, CASTL/

g hidraulicos /Tajo, Duero, Sil/

h horas /1\*4/

s escenarios /1\*4/

alias (s,s2);

;

parameters

pmax(t) Potencia m´axima de cada t´ermico [MW]

/GAL 400, CAT 500, MAD 700, VAL 400, EXT-AND 900, CASTL 800/ pmin(t) Potencia m´ınima de cada t´ermico [MW]

/GAL 100, CAT 150, MAD 150, VAL 50, EXT-AND 450, CASTL 200 / rs(t) Rampa de subida [Mw por hora]

/GAL 200, CAT 300, MAD 500, VAL 300, EXT-AND 600, CASTL 400/ rb(t) Rampa de bajada [Mw por hora]

/GAL 300, CAT 300, MAD 200, VAL 100, EXT-AND 600, CASTL 400/ a(t) T´ermino independiente [€]

/GAL 50, CAT 30, MAD 30, VAL 25, EXT-AND 80, CASTL 70/ b(t) T´ermino lineal de producci´on (Coste unitario) [€ por MWh] /GAL 4, CAT 5, MAD 4.2, VAL 4.5, EXT-AND 2, CASTL 3/ d(h) Demanda por horas [MW]

/1 2500 ,2 2800 ,3 3900 ,4 3000/

pmaxtur(g) potencia maxima [Mw] de la turbina del grupo hidraulico g /Tajo 700,Duero 1500,Sil 600/

rmax(g) reserva maxima del grupo [Mw] hidraulico g

/Tajo 4180000,Duero 6790000,Sil 2600000/

rmin(g) reserva minima del [Mw] grupo hidraulico g

/Tajo 4179000,Duero 6789000,Sil 2598000/

RHI(g) reserva inicial [Mw] del grupo hidraulico g

/Tajo 4179000,Duero 6789000,Sil 2599000/

f(g) fluyente [Mw] del grupo hidraulico g

/Tajo 160,Duero 440,Sil 200/

TI(t) T´ermino independiente [€]

/GAL 400, CAT 450, MAD 500, VAL 200, EXT-AND 600, CASTL 1000/ TL(t) T´ermino lineal de producci´on [€ por MWh]

17

Taller de economatem´atica

/GAL 0.25, CAT 0.2, MAD 0.2, VAL 0.01, EXT-AND 0.1, CASTL 0.2/ TC(t) T´ermino cuadr´atico [€MWh2]

/ GAL 0.007, CAT 0.006, MAD 0.0045, VAL 0.009, EXT-AND 0.0015, CASTL 0.002/ ca(t) Coste de arranque [€]

/GAL 10, CAT 20, MAD 10, VAL 15, EXT-AND 20, CASTL 15/

cp(t) Coste de parada [€]

/GAL 5, CAT 10, MAD 5, VAL 10, EXT-AND 15, CASTL 10/

PROB(s) probabilidad cada escenario [p.u.] /1 0.36, 2 0.24, 3 0.24, 4 0.16/ ;

table apor(h,g) aportacion hidraulica [Mwh] de cada rio

Tajo Duero Sil

1 190 500 220

2 200 550 250

3 250 600 300

4 180 470 200

;

table DEMS(s,h) demanda estoc´astica [MW] para escenario y hora 1 2 3 4

1 2500 2800 4290 3300

2 2500 2800 4290 2550

3 2500 2800 3315 3300

4 2500 2800 3315 2550

;

table P(s,h) probabilidad de cada escenario en cada hora

1 2 3 4

1 1 1 0.6 0.36

2 1 1 0.6 0.24

3 1 1 0.4 0.24

4 1 1 0.4 0.16

;

table LUCI(s,h)

1 2 3 4

1 1 1 1 1

2 1 1 1 2

3 1 1 3 3

4 1 1 3 4

;

variables

18

Taller de economatem´atica

obj el valor [€] de la funcion objetivo

PT(t,h) produccion [MW] del grupo termico t la hora h

PH(g,h) produccion [MW] del grupo hidraulico g la hora h

Y1(t,h) esta acoplado el grupo termico t la hora h

RH(g,h) reserva [Mwh] del grupo g la hora h

casa(h) precio de casacion [€] la hora h

V(g,h) vertido [Mwh] del grupo g la hora h

Par(t,h) el grupo termico t para en la hora h

Arr(t,h) el grupo termico t arranca en la hora h

EPT(s,t,h) produccion [MW] del grupo termico t la hora h en el modelo estoc EPH(s,g,h) produccion [MW] del grupo hidraulico g la hora h en el modelo estoc EY1(s,t,h) esta acoplado el grupo termico t la hora h en el modelo estoc ERH(s,g,h) reserva [Mwh] del grupo g la hora h en el modelo estoc EV(s,g,h) vertido [Mwh] del grupo g la hora h en el modelo estoc EPar(s,t,h) el grupo termico t para en la hora h en el modelo estoc EArr(s,t,h) el grupo termico t arranca en la hora h en el modelo estoc ;

positive variables PT(t,h), PH(g,h), V(g,h),

EPT(s,t,h), EPH(s,g,h), EV(s,g,h)

;

binary variables Y1(t,h), Par(t,h), Arr(t,h),

EY1(s,t,h), EPar(s,t,h), EArr(s,t,h)

;

equations

fobj1 coste total modelo 1

fdem demanda

fpmax potencia maxima

fpmin potencia minima

fsubida rampa de subida

fbajada rampa de bajada

ffluyente fluyente

freservamax reserva maxima

freservamin reserva minima

fbalance restriccion de balance

frr reserva rodante

fobj2 coste total modelo 2

fcasa el precio de casacion es maximo

19

Taller de economatem´atica

fobj3 coste total modelo 3

fencendido determina el encendido y apagado de los grupos fobj4 coste total modelo 4

fc1 garantiza un modelo periodico en lo tocante a rampa de subida fc2 garantiza un modelo periodico en lo tocante a rampaa de bajada fc3 garantiza un modelo periodico en lo tocante a encendido

Efdem demanda

Efpmax potencia maxima

Efpmin potencia minima

Efsubida rampa de subida

Efbajada rampa de bajada

Effluyente fluyente

Efreservamax reserva maxima

Efreservamin reserva minima

Efbalance restriccion de balance

Efrr reserva rodanteo

Efobj4 coste total modelo 4

Efencendido determina el encendido y apagado de los grupos EfbalanceI ecuacion de valance inicial

;

fobj1.. obj =E= sum(h, sum(t, b(t)\*PT(t,h)));

fdem(h).. d(h) =E= sum(t, PT(t,h)) + sum(g, PH(g,h)); fpmax(t,h).. PT(t,h) =L= pmax(t)\*Y1(t,h);

fpmin(t,h).. pmin(t)\*Y1(t,h) =L= PT(t,h);

fsubida(t,h).. PT(t,h)-PT(t,h-1) =L= rs(t);

fbajada(t,h).. PT(t,h-1)-PT(t,h) =L= rb(t);

ffluyente(g,h).. PH(g,h) + f(g) =L= pmaxtur(g);

freservamax(g,h).. RH(g,h) =L= rmax(g);

freservamin(g,h).. rmin(g) =L= RH(g,h);

fbalance(g,h).. RH(g,h) =E= RH(g,h-1)$(ord(h)>1) + RHI(g)$(ord(h)=1) - PH(g,h) + apor(h,g) - V(g,h);

frr(h).. sum(t, pmax(t)\*Y1(t,h) - PT(t,h)) =G= 0.2\*d(h); fobj2.. obj =E= sum(h, d(h)\*casa(h));

fcasa(t,h).. casa(h) =G= b(t)\*Y1(t,h);

fobj3.. obj =E=sum(h, sum(t,TC(t)\*PT(t,h)\*PT(t,h) + TL(t)\*PT(t,h) + TI(t)\*Y1(t,h)) + sum(t, Arr(t,h)\*ca(t) + Par(t,h)\*cp(t)) ); fencendido(t,h).. Y1(t,h)-Y1(t,h-1) =E= Arr(t,h) - Par(t,h);

20

Taller de economatem´atica

fobj4.. obj =E= sum(h, sum(t, b(t)\*PT(t,h) + a(t)\*Y1(t,h)

+ Arr(t,h)\*ca(t) + Par(t,h)\*cp(t)));

fc1(t,h).. PT(t,h)-PT(t,h--1) =L= rs(t);

fc2(t,h).. PT(t,h--1)-PT(t,h) =L= rb(t);

fc3(t,h).. Y1(t,h)-Y1(t,h--1) =E= Arr(t,h) - Par(t,h);

Efobj4.. obj =E= SUM((s,t,h)$(ord(s)=LUCI(s,h)), P(s,h)\* (a(t)\*EY1(s,t,h) + b(t)\*EPT(s,t,h) + ca(t)\*EArr(s,t,h) + cp(t)\*Epar(s,t,h))); Efdem(s,h)$(ord(s)=LUCI(s,h)).. DEMS(s,h) =E= sum(t, EPT(s,t,h)) + sum(g, EPH(s,g,h));

Efpmax(s,t,h)$(ord(s)=LUCI(s,h)).. EPT(s,t,h) =L= pmax(t)\*EY1(s,t,h); Efpmin(s,t,h)$(ord(s)=LUCI(s,h)).. pmin(t)\*EY1(s,t,h) =L= EPT(s,t,h); Efsubida(s,t,h,s2)$(ord(s)=LUCI(s,h) and (ord(s2)=LUCI(s,h-1) or ord(h)=1)).. EPT(s,t,h) - EPT(s2,t,h-1) =L= rs(t);

Efbajada(t,h,s,s2)$(ord(s)=LUCI(s,h) and (ord(s2)=LUCI(s,h-1) or ord(h)=1)).. EPT(s2,t,h-1) - EPT(s,t,h) =L= rb(t);

Effluyente(s,g,h)$(ord(s)=LUCI(s,h)).. EPH(s,g,h) + f(g) =L= pmaxtur(g); Efreservamax(s,g,h)$(ord(s)=LUCI(s,h)).. ERH(s,g,h) =L= rmax(g); Efreservamin(s,g,h)$(ord(s)=LUCI(s,h)).. rmin(g) =L= ERH(s,g,h); Efbalance(s,g,h)$(ord(h)>1).. ERH(s,g,h) =E= sum(s2$(ord(s2)=LUCI(s,h-1)), ERH(s2,g,h-1)) - EPH(s,g,h) +apor(h,g)-EV(s,g,h);

EfbalanceI(s,g,h)$(ord(h)=1).. ERH(s,g,h) =E= RHI(g) - EPH(s,g,h) + apor(h,g) - EV(s,g,h);

Efrr(s,h)$(ord(s)=LUCI(s,h))..

sum(t, pmax(t)\*EY1(s,t,h) - EPT(s,t,h)) =G=0.2\*DEMS(s,h);

Efencendido(s,t,h,s2)$(ord(s)=LUCI(s,h) and(ord(s2)=LUCI(s,h-1) or ord(h)=1)).. EY1(s,t,h)-EY1(s2,t,h-1) =E= EArr(s,t,h) - EPar(s,t,h);

model modelo\_1 /fobj1, fdem, fpmax, fpmin, fsubida, fbajada, ffluyente, freservamax, freservamin, fbalance, frr/;

model modelo\_2 /fobj2, fdem, fpmax, fpmin, fsubida, fbajada, ffluyente, freservamax, freservamin, fbalance, frr, fcasa/;

model modelo\_3 /fobj3, fdem, fpmax, fpmin, fsubida, fbajada, ffluyente, freservamax, freservamin, fbalance, frr, fencendido/;

model modelo\_4 /fobj4, fdem, fpmax, fpmin, fsubida, fbajada, ffluyente, freservamax, freservamin, fbalance, frr, fencendido/;

model modelo\_5 /fobj4, fdem, fpmax, fpmin, ffluyente,

freservamax, freservamin, fbalance, frr, fencendido/;

solve modelo\_1 using MIP minimizing obj;

21

Taller de economatem´atica

solve modelo\_2 using MIP minimizing obj;

option MIQCP = cplex;

solve modelo\_3 using MIQCP minimizing obj;

solve modelo\_4 using MIP minimizing obj;

solve modelo\_5 using MIP minimizing obj;

MODEL MODELO\_6\_DETERM /fobj4, fdem, fpmax, fpmin, ffluyente, fbajada, fsubida, freservamax, freservamin, fbalance, frr, fencendido/;

loop(s,

d(h) = DEMS(s,h);

solve MODELO\_6\_DETERM using MIP minimizing obj;)

MODEL MODELO\_6\_ESTOC /Efobj4, Efdem, Efpmax, Efpmin, Effluyente, Efsubida, Efbajada, Efreservamax, Efreservamin, Efbalance, Efrr, Efencendido, EfbalanceI/; solve MODELO\_6\_ESTOC using MIP minimizing obj;

22