

UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID

Facultad de Ciencias Matemáticas



INFORME COORDINACIÓN HIDROTÉRMICA

José Luis Abad Tejado, Óscar Cirujano Gil, Jorge Lucena Palop y
Daniel Serrano García

GRADO EN INGENIERÍA MATEMÁTICA

Curso: 2020/2021

ASIGNATURA:

Taller de Economatemática

PROFESORADO:

María Teresa Oruño Sánchez y Begoña Vitoriano Villanueva

MADRID

2021

ÍNDICE

1. MODELIZACIÓN	3
1.1. Modelo 1.....	4
a. Conclusiones y resultados del Modelo 1.....	5
1.2. Modelo 2.....	6
a. Conclusiones y resultados del Modelo 2.....	6
1.3. Modelo 3.....	7
a. Conclusiones y resultados del Modelo 3.....	7
1.4. Modelo 4.....	8
a. Conclusiones y resultados del Modelo 4.....	8
1.5. Modelo 5.....	9
a. Solución estocástica.....	10
b. Valor de la solución estocástica.....	11
c. Valor con información perfecta.....	11
d. Valor de la información perfecta.....	12
e. Máximo arrepentimiento.....	12
2. ANEXO DE CÓDIGO.....	13
3. ANEXO DE FIGURAS.....	19

1. MODELIZACIÓN

En primer lugar, llevamos a cabo la distinción entre variables y datos del problema.

- Índices:
 - $t = \text{GAL, CAT, MAD, VAL, EXT-AND, CASTL}$
 - $w = \text{Tajo, Duero, Sil}$
 - $h = 1, 2, 3, 4$
- Variables:
 - $PT_{t,h}$ = Potencia del grupo térmico t en la hora h (MW)
 - $PH_{w,h}$ = Potencia del grupo hidráulico w en la hora h (MW)
 - $Ve_{w,h}$ = Vertidos del grupo hidráulico w en la hora h
 - $Pro_{t,h}$ = Si el térmico t produce en la hora h o no
 - Lambda_h = Precio de la energía en la hora h
 - $X_{t,h}$ = Si se arranca el térmico t en la hora h
 - $Y_{t,h}$ = Si se para el térmico t en la hora h
- Datos:
 - $pmaxT_t$ = Potencia máxima de cada térmico t (MW)
 - $pminT_t$ = Potencia mínima de cada térmico t (MW)
 - $rampa_sub_t$ = Rampa de subida del térmico t (MWh)
 - $rampa_baj_t$ = Rampa de bajada del térmico t (MWh)
 - $coste_arr_t$ = Coste de arranque del térmico t (€)
 - $coste_par_t$ = Coste de parada del térmico t (€)
 - a_t = Término independiente de la aproximación lineal (€)
 - b_t = Término lineal de la producción de la aproximación lineal (€ por MWh)
 - g_t = Término independiente de la aproximación cuadrática (€)
 - k_t = Término lineal de la producción de la aproximación cuadrática (€ por MWh)
 - s_t = Término cuadrático de la producción de la aproximación cuadrática (€ por MWh²)

- dem_h = demanda horaria inelástica (MW)
- $pmaxH_w$ = Reserva máxima de cada hidráulico w (MWh)
- $reserva_max_w$ = Reserva máxima de cada hidráulico w (MWh)
- $reserva_min_w$ = Reserva mínima de cada hidráulico w (MWh)
- $fluyente_w$ = Fluyente de cada hidráulico w (MW)
- $reserva_rod$ = Valor fijo de la proporción de reserva
- $aportaciones_{w,h}$ = Aportaciones de cada hidráulico cada hora (MWh)

Una vez establecidas las variables y los datos construimos los diferentes modelos de programación matemática.

1.1. Modelo 1

- Función objetivo:

$$\bullet \sum_{t,h} b_t * PT_{t,h} \rightarrow \text{Costes de producción considerando el término lineal}$$

- Restricciones:

- $\sum_t PT_{t,h} + \sum_w PH_{w,h} = dem_h \quad \forall h \rightarrow$ Se satisface la demanda
- $pminT_t * Pro_{t,h} \leq PT_{t,h} \quad \forall t, h \rightarrow$ Potencia máxima de los grupos térmicos
- $PT_{t,h} \leq pmaxT_t * Pro_{t,h} \quad \forall t, h \rightarrow$ Potencia máxima de los grupos térmicos
- $PT_{t,h} - PT_{t,h-1} \leq rampa_sub_t \quad \forall t, h \rightarrow$ Rampa de subida
- $PT_{t,h-1} - PT_{t,h} \leq rampa_baj_t \quad \forall t, h > 1 \rightarrow$ Rampa de bajada
- $RH_{w,h} = reserva_ini_{w,h} + RH_{w,h-1} - PH_{w,h} - Ve_{w,h} + aportaciones_{w,h} \quad \forall w, h \rightarrow$ Reserva que queda al final de cada hora

a. Conclusiones y resultados del Modelo 1

Se obtienen, tras la ejecución del modelo mediante GAMS, los siguientes resultados de potencia (MW/h) para cada uno de los grupos en las 4 horas estudiadas:

		GRUPOS TÉRMICOS E HIDRÁULICOS								
		GAL	CAT	MAD	VAL	EXT-AND	CASTL	TAJO	DUERO	SIL
HORAS	1	200	0	210	0	600	400	190	500	400
	2	350	0	150	0	900	800	0	200	400
	3	400	0	0	0	900	800	450	950	400
	4	250	0	0	0	900	800	180	470	400

Figura 1.1.a.1.: Tabla de la potencia generada por hora en el Modelo 1.

De esta tabla se puede deducir también el horario de cada uno de los grupos. Así como cuándo empieza y deja de producir cada uno de ellos.

Tenemos un coste total de 21312 €. Se puede observar que los grupos térmicos de CAT y VAL no se utilizan, esto es debido a que son los que presentan un término lineal de producción de la aproximación lineal más elevado. Evitamos de esta forma su uso para reportar menores gastos.

Por otro lado, observamos el marginal en las ecuaciones de demanda y podemos obtener así el precio unitario del agua cada hora. En la siguiente tabla se muestra este precio

	Hora 1	Hora 2	Hora 3	Hora 4
Valor del agua	4,2 €	4 €	4 €	4 €

Figura 1.1.a.2.: Tabla con el valor del agua en cada hora.

1.2. Modelo 2

Este modelo lo construimos como una ampliación del primero, cambiando su función objetivo y añadiendo nuevas restricciones.

- Función objetivo:

- $\sum_h (Lambda_h * dem_h) \rightarrow$ Costes pagando a todos el máximo del coste unitario de los grupos que están generando esa hora

- Nuevas restricciones:

- $b_t * Pro_{t,h} \leq Lambda_h \quad \forall t, h \rightarrow$ Se fija el precio al máximo coste unitario cada hora

a. Conclusiones y resultados del Modelo 2

Se obtienen, tras la ejecución del modelo mediante GAMS, los siguientes resultados de potencia (MW/h) para cada uno de los grupos en las 4 horas estudiadas:

		GRUPOS TÉRMICOS E HIDRÁULICOS								
		GAL	CAT	MAD	VAL	EXT-AND	CASTL	TAJO	DUERO	SIL
HORAS	1	200	0	400	100	600	400	0	400	400
	2	400	0	200	0	900	800	0	100	400
	3	300	0	0	0	900	800	440	1060	400
	4	0	0	0	0	900	800	380	560	360

Figura 1.2.a.1.: Tabla de la potencia generada por hora en el Modelo 2.

De esta tabla se puede deducir también el horario de cada uno de los grupos. Así como cuándo empieza y deja de producir cada uno de ellos.

Tenemos un coste total de 47610 €. Al igual que en el anterior modelo se puede observar que los grupos térmicos de CAT y VAL no se utilizan o se utilizan mínimamente, esto puede ocurrir por el mismo motivo que en el caso anterior.

El precio horario de producción en cada hora es el siguiente:

	Hora 1	Hora 2	Hora 3	Hora 4
Precio	4,5 €	4,2 €	4 €	3 €

Figura 1.2.a.2.: Tabla con el precio de producción de potencia cada hora.

1.3. Modelo 3

Este modelo también lo construimos como una ampliación del primero.

- Función objetivo:
 - $\sum_{t,h} (g_t * Pro_{t,h} + k_t * PT_{t,h} + s_t * PT_{t,h}^2 + coste_arr_t * X_{t,h} + coste_par_t * Y_{t,h}) \rightarrow$ Coste de la aproximación cuadrática teniendo en cuenta los costes de arranque y parada
- Nuevas restricciones:
 - $X_{t,h} \geq Pro_{t,h} - Pro_{t,h-1} \quad \forall t, h \rightarrow$ Si se arranca un térmico entre una hora y la siguiente
 - $Y_{t,h} \geq Pro_{t,h-1} - Pro_{t,h} \quad \forall t, h > 1 \rightarrow$ Si se para un térmico entre una hora y la siguiente

a. Conclusiones y resultados del Modelo 3

Se obtienen, tras la ejecución del modelo mediante GAMS, los siguientes resultados de potencia (MW/h) para cada uno de los grupos en las 4 horas estudiadas:

		GRUPOS TÉRMICOS E HIDRÁULICOS								
		GAL	CAT	MAD	VAL	EXT-AND	CASTL	TAJO	DUERO	SIL
HORAS	1	0	0	319,815	170,463	600	400	109,722	500	400
	2	0	0	319,815	170,463	900	719,583	0	290,139	400
	3	0	0	319,815	170,463	900	719,583	530,278	859,861	400
	4	0	0	282,387	151,749	880,494	635,37	180	470	400

Figura 1.3.a.1.: Tabla de la potencia generada por hora en el Modelo 3.

De esta tabla se puede deducir también el horario de cada uno de los grupos. Así como cuándo empieza y deja de producir cada uno de ellos.

Tenemos un coste total de 20400,8967 €. Al igual que en los anteriores modelos, el grupo CAT no se utiliza para la generación de potencia. Sin embargo, en este caso es el grupo CASTL el que tiene una totalidad de 0 MW/h generados en lugar de VAL.

1.4. Modelo 4

Este modelo lo construimos como una ampliación del tercero, cambiando la función objetivo y añadiendo nuevas restricciones.

- Función objetivo:
 - $\sum_{t,h}(b_t * PT_{t,h} + a_t * Pro_{t,h} + coste_arr_t * X_{t,h} + coste_par_t * Y_{t,h}) \rightarrow$ Coste de la aproximación lineal
teniendo en cuenta los costes de arranque y parada
- Nuevas restricciones:
 - $dem_h * reserva_rod + \sum_t PT_{t,h} \leq \sum_t (pmaxT_t * Pro_{t,h}) \quad \forall h$
 \rightarrow Reserva rodante mínima de un 20%

a. Conclusiones y resultados del Modelo 4

Se obtienen, tras la ejecución del modelo mediante GAMS, los siguientes resultados de potencia (MW/h) para cada uno de los grupos en las 4 horas estudiadas:

		GRUPOS TÉRMICOS E HIDRÁULICOS								
		GAL	CAT	MAD	VAL	EXT-AND	CASTL	TAJO	DUERO	SIL
HORAS	1	200	0	250	0	600	400	190	460	400
	2	390	0	150	0	900	800	30	130	400
	3	170	0	150	0	900	800	420	1060	400
	4	100	0	150	0	900	800	180	470	400

Figura 1.4.a.1.: Tabla de la potencia generada por hora en el Modelo 4.

De esta tabla se puede deducir también el horario de cada uno de los grupos. Así como cuándo empieza y deja de producir cada uno de ellos.

Tenemos un coste total de 22355 €. Como ocurría en los primeros modelos, los grupos CAT y VAL no se utilizan para la generación de potencia debido a sus costes más elevados en comparación con el resto de grupos.

1.5. Modelo 5

El modelo estocástico lo vemos por apartados. En cada uno de ellos veremos, respectivamente, la solución estocástica, el valor de la solución estocástica, el valor esperado con información perfecta y el valor esperado de la información perfecta. Por último, veremos la minimización del máximo arrepentimiento. Para formular el modelo añadiremos la siguiente información al modelo 4 ya modelizado anteriormente.

- Índices nuevos:
 - $e = e1, e2, e3, e4$
 - $e' = e1, e2, e3, e4$
- Variables nuevas:
 - $PTS_{t,h,e}$ = Potencia del grupo térmico t en la hora h en el escenario e (MW)
 - $PHS_{w,h,e}$ = Potencia del grupo hidráulico w en la hora h en el escenario e (MW)
 - $VeS_{w,h,e}$ = Vertidos del grupo hidráulico w en la hora h en el escenario e (MW)
 - $ProS_{t,h,e}$ = Si el térmico t produce en la hora h en el escenario e o no
 - $XS_{t,h,e}$ = Si se arranca el térmico t en la hora h en el escenario e
 - $YS_{t,h,e}$ = Si se para el térmico t en la hora h en el escenario e
- Datos:
 - $aports_{w,h,e}$ = Aportaciones del hidráulico w en la hora h en el escenario e (MW)
 - $escenario_{h,e,e'}$ = Indica si el escenario e' precede al e en la hora h
 - $prob_{e,h}$ = Probabilidad de que se dé el escenario e en la hora h
 - $existe_{e,h}$ = Indica si en la hora h existe el escenario e

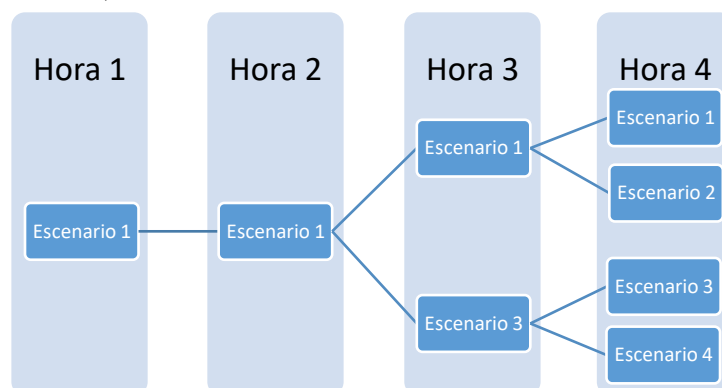


Figura 1.5.1.: Diagrama de árbol con los distintos escenarios posibles en cada hora.

a. Solución estocástica

- Función objetivo:

- $\sum_{t,h,e} (prob_{e,h} * (b_t * PTS_{t,h,e} + a_t * ProS_{t,h,e} + coste_arr_t * XS_{t,h,e} + coste_par_t * YS_{t,h,e}))$
→ Coste de la aproximación lineal estocástica teniendo en cuenta los costes de arranque y parada

- Restricciones:

- $\sum_t PTS_{t,h,e} + \sum_w PHS_{w,h,e} = existe_{e,h} * dem_h \forall e, h$
→ Se satisface la demanda
- $(pminT_t * ProS_{t,h,e}) * existe_{e,h} \leq PTS_{t,h,e} \forall t, h, e$
→ Potencia máxima de los grupos térmicos
- $PTS_{t,h,e} \leq (pmaxT_t * ProS_{t,h,e}) * existe_{e,h} \forall t, h, e$
→ Potencia máxima de los grupos térmicos
- $\sum_{e'} [(PTS_{t,h,e} - PTS_{t,h-1,e'}) * escenario_{h,e,e'}] \leq rampa_sub_t \forall t, h, e$ → Rampa de subida
- $\sum_{e'} [(PTS_{t,h-1,e'} - PTS_{t,h,e}) * escenario_{h,e,e'}] \leq rampa_baj_t \forall t, e, h > 1$ → Rampa de bajada
- $RHS_{w,h,e} = \sum_{e'} [(reserva_ini_{w,h} + RHS_{w,h-1,e'} - PHS_{w,h,e} - VeS_{w,h,e} + aportS_{w,h,e}) * escenario_{h,e,e'}]$
 $\forall w, h, e$ → Reserva que queda cada hora
- $XS_{t,h,e} \geq \sum_{e'} [(ProS_{t,h,e} - ProS_{t,h-1,e'}) * escenario_{h,e,e'}]$
 $\forall t, h, e$ → Si se arranca un térmico entre una hora y la siguiente
- $YS_{t,h,e} \geq \sum_{e'} [(ProS_{t,h-1,e'} - ProS_{t,h,e}) * escenario_{h,e,e'}]$
 $\forall t, e, h > 1$ → Si se para un térmico entre una hora y la siguiente
- $dem_h * reserva_rod + \sum_t PTS_{t,h,e} \leq \sum_t (pmaxT_t * ProS_{t,h,e})$
 $\forall e, h$ → Reserva rodante mínima de un 20%

- Resultado:

Tenemos un coste total de 22387,4 €. Como ocurría en los anteriores modelos, el grupo CAL no se utiliza para la generación de potencia, sin embargo, todos los demás grupos se usan, incluyendo VAL, que se utiliza en algún escenario.

b. Valor de la solución estocástica

Para este apartado solo hay que hacer un cálculo, ya que hemos hallado previamente las soluciones necesarias. Vemos que la solución determinista con valores medios de las aportaciones coincide con la solución del apartado 4.

- Función objetivo:

$$\text{Solución estocástica} - \text{Solución Modelo 4}$$

- Resultado:

$$32.4 \text{ €}$$

c. Valor con información perfecta

- Variable nueva:

- δ_e = Solución al problema determinista con las aportaciones del escenario e

Para este apartado resolvemos los 4 problemas deterministas correspondientes a tomar cada uno de los posibles escenarios como datos que sabemos a priori. Este resultado debe ser menor al hallado en la solución estocástica. Almacenamos estos resultados en nuestra nueva variable y la función objetivo nos quedaría:

- Función objetivo:

$$\sum_e (prob_{e,4} * \delta_e)$$

- Resultado:

$$22383.600 \text{ €}$$

d. Valor de la información perfecta

Para este apartado solo hay que hacer un cálculo, ya que hemos calculado previamente las soluciones necesarias.

- Función objetivo:

$$\text{Solución estocástica} - \text{Valor con información perfecta}$$

- Resultado:

$$3.8 \text{ €}$$

e. Máximo arrepentimiento

Por último, vamos a minimizar el máximo arrepentimiento. Para ello necesitaremos una nueva variable Z con una nueva restricción:

- Nueva restricción:

$$Z \geq \text{Solución estocástica} - \delta_e \quad \forall e$$

- Función objetivo:

$$Z \rightarrow \text{Minimizamos el máximo valor que toma } Z.$$

- Resultado:

Nos queda como resultado un coste de 1235,4 €. Z alcanza este valor en el escenario 1.

2. ANEXO DE CÓDIGO

Adjuntamos el código ejecutable en GAMS asociado a la resolución del Modelo 5 y sus respectivos apartados.

\$Title Coordinacion Hidrotermica - Modelo 5 - TECO 3

Sets

t grupos térmicos /GAL,CAT,MAD,VAL,EXT-AND,CASTL/

w grupos hidráulicos /Tajo,Duero,Sil/

h horas /1*4/

e escenarios /e1,e2,e3,e4/

alias(e,eprima)

;

Parameters

pmaxT(t) Potencia máxima de cada térmico (MW) /GAL 400,CAT 500,MAD 700,VAL 400,EXT-AND 900,CASTL 800/

pminT(t) Potencia mínima de cada térmico (MW) /GAL 100,CAT 150,MAD 150,VAL 50,EXT-AND 450,CASTL 200/

rampa_sub(t) Rampa de subida (MWh) /GAL 200,CAT 300,MAD 500,VAL 300,EXT-AND 600,CASTL 400/

rampa_baj(t) Rampa de bajada (MWh) /GAL 300,CAT 300,MAD 200,VAL 100,EXT-AND 600,CASTL 400/

coste_arr(t) Coste de arranque (€) /GAL 10,CAT 20,MAD 10,VAL 15,EXT-AND 20,CASTL 15/

coste_par(t) Coste de parada (€) /GAL 5,CAT 10,MAD 5,VAL 10,EXT-AND 15,CASTL 10/

a(t) Término independiente de la aproximación lineal (€) /GAL 50,CAT 30,MAD 30,VAL 25,EXT-AND 80,CASTL 70/

b(t) Término lineal de producción de la aproximación lineal (€ por MWh) /GAL 4,CAT 5,MAD 4.2,VAL 4.5,EXT-AND 2,CASTL 3/

dem(h) Demanda horaria inelástica (MW) /1 2500,2 2800,3 3900,4 3000/

pmaxH(w) Potencia máxima de cada hidráulico (MW) /Tajo 700,Duero 1500,Sil 600/

reserva_max(w) Reserva máxima de cada hidráulico (MWh) /Tajo 4180000,Duero 6790000,Sil 2600000/

reserva_min(w) Reserva mínima de cada hidráulico (MWh) /Tajo 4179000,Duero 6789000,Sil 2598000/

fluyente(w) Fluyente de cada hidráulico (MW) /Tajo 160,Duero 440,Sil 200/

reserva_rod Valor fijo de la proporción de reserva /0.2/

determinista Valor de la función objetivo del Modelo 4 /22355/

;

Table aportaciones(w,h) Aportaciones de cada hidráulico w cada hora h (MWh)

1 2 3 4

Tajo 190 200 250 180

Duero 500 550 600 470
 Sil 220 250 300 200
 ;

Table tablasapor(w,h,e) Aportaciones de cada hidráulico w cada hora h en el escenario e (MWh)

	e1	e2	e3	e4
Tajo .1	190	190	190	190
Tajo .2	200	200	200	200
Tajo .3	300	300	175	175
Tajo .4	216	126	216	126
Duero.1	500	500	500	500
Duero.2	550	550	550	550
Duero.3	720	720	420	420
Duero.4	564	329	564	329
Sil .1	220	220	220	220
Sil .2	250	250	250	250
Sil .3	360	360	210	210
Sil .4	240	140	240	140

;

Table aportS(w,h,e) Aportaciones de cada hidráulico w cada hora h en el escenario e (MWh)

	e1	e2	e3	e4
Tajo .1	190	0	0	0
Tajo .2	200	0	0	0
Tajo .3	300	0	175	0
Tajo .4	216	126	216	126
Duero.1	500	0	0	0
Duero.2	550	0	0	0
Duero.3	720	0	420	0
Duero.4	564	329	564	329
Sil .1	220	0	0	0
Sil .2	250	0	0	0
Sil .3	360	0	210	0
Sil .4	240	140	240	140

;

Table reserva_ini(w,h) Reserva al comienzo de la primera hora de cada hidráulico w (MWh)

1
Tajo 4179000
Duero 6789000
Sil 2599000

;

Table escenario(h,e,eprima) Indica si el escenario eprima precede al escenario e o no

	e1	e2	e3	e4
1.e1	1	0	0	0
1.e2	0	0	0	0

```

1.e3 0 0 0 0
1.e4 0 0 0 0
2.e1 1 0 0 0
2.e2 0 0 0 0
2.e3 0 0 0 0
2.e4 0 0 0 0
3.e1 1 0 0 0
3.e2 0 0 0 0
3.e3 1 0 0 0
3.e4 0 0 0 0
4.e1 1 0 0 0
4.e2 1 0 0 0
4.e3 0 0 1 0
4.e4 0 0 1 0
;

```

Table existe(e,h) Indica si en la hora h existe el escenario e

```

1 2 3 4
e1 1 1 1 1
e2 0 0 0 1
e3 0 0 1 1
e4 0 0 0 1
;

```

Table prob(e,h) Probabilidad de que se de el escenario e en la hora h

```

1 2 3 4
e1 1 1 0.6 0.36
e2 0 0 0 0.24
e3 0 0 0.4 0.24
e4 0 0 0 0.16
;

```

Variables

Z1 Valor del mínimo coste estocástico

Z2 Valor óptimo de la solución estocástica

Z3 Valor esperado con información perfecta

Z4 Valor esperado de la información perfecta

ZS Auxiliar para almacenar los valores deterministas

Z Valor que minimiza el máximo arrepentimiento

PT(t,h) Potencia del grupo térmico t en la hora h (MWh)

PTS(t,h,e) Potencia del grupo térmico t en la hora h en el escenario e (MWh)

PH(w,h) Potencia del grupo hidráulico w en la hora h (MWh)

PHS(w,h,e) Potencia del grupo hidráulico w en la hora h en el escenario e (MWh)

RH(w,h) Reserva del hidráulico w al final de la hora h (MWh)

RHS(w,h,e) Reserva del hidráulico w al final de la hora h en el escenario e (MWh)

Ve(w,h) Vertidos (MWh)

VeS(w,h,e) Vertidos en el escenario e (MWh)

Pro(t,h) Si el térmico t produce en la hora h o no

ProS(t,h,e) Si el térmico t produce en la hora h o no en el escenario e

X(t,h) Si se arranca el térmico t en la hora h

XS(t,h,e) Si se arranca el térmico t en la hora h en el escenario e
Y(t,h) Si se para el térmico t en la hora h
YS(t,h,e) Si se para el térmico t en la hora h en el escenario e
delta(e) Almacena el óptimo determinista de cada escenario e
;

Positive Variables PT(t,h), PH(w,h), RH(w,h), Ve(w,h), Lambda(h), PTS(t,h,e),
PHS(w,h,e), RHS(w,h,e), VeS(w,h,e), LambdaS(h,e);
Binary Variables Pro(t,h), X(t,h), Y(t,h), ProS(t,h,e), XS(t,h,e), YS(t,h,e);

RH.UP(w,h) = reserva_max(w);
RH.LO(w,h) = reserva_min(w);
PH.UP(w,h) = pmaxH(w) - fluyente(w);

RHS.UP(w,h,e) = reserva_max(w)*existe(e,h);
RHS.LO(w,h,e) = reserva_min(w)*existe(e,h);
PHS.UP(w,h,e) = (pmaxH(w) - fluyente(w))*existe(e,h);

Equations

SolEstoc función objetivo estocástica
demanda(h,e) hace que se satisfaga la demanda
potminT(t,h,e) potencia mínima de los grupos térmicos
potmaxT(t,h,e) potencia máxima de los grupos térmicos
rsub(t,h,e) rampa de subida
rbaj(t,h,e) rampa de bajada
reserva(w,h,e) reserva que queda cada hora
arranque(t,h,e) si se arranca un térmico entre una hora y la siguiente
parada(t,h,e) si se para un térmico entre una hora y la siguiente
rodante(h,e) reserva rodante mínima de un 20%

FObjetivo función objetivo determinista

demandaDet(h) hace que se satisfaga la demanda
potminTDet(t,h) potencia mínima de los grupos térmicos
potmaxTDet(t,h) potencia máxima de los grupos térmicos
rsubDet(t,h) rampa de subida
rbajDet(t,h) rampa de bajada
reservaDet(w,h) reserva que queda cada hora
arranqueDet(t,h) si se arranca un térmico entre una hora y la siguiente
paradaDet(t,h) si se para un térmico entre una hora y la siguiente
rodanteDet reserva rodante mínima de un 20%

adicional(e) para minimizar el máximo arrepentimiento;

SolEstoc.. Z1 =E= sum(e, sum(t, sum(h, prob(e,h)*(b(t)*PTS(t,h,e) + a(t)*ProS(t,h,e))))
+
sum(t, sum(h, prob(e,h)*(coste_arr(t)*XS(t,h,e)))) + sum(t, sum(h,
prob(e,h)*(coste_par(t)*YS(t,h,e))));
demanda(h,e).. sum(t, PTS(t,h,e)) + sum(w, PHS(w,h,e)) =E= existe(e,h)*dem(h);
potminT(t,h,e).. PTS(t,h,e) =G= existe(e,h)*(pminT(t) * ProS(t,h,e));


```

potmaxT(t,h,e).. PTS(t,h,e) =L= existe(e,h)*(pmaxT(t) * ProS(t,h,e));
rsub(t,h,e).. sum(eprima,(PTS(t,h,e) - PTS(t,h-1,eprima)) * escenario(h,e,eprima)) =L=
rampa_sub(t);
rbaj(t,h,e)$(ord(h)>1).. sum(eprima,(PTS(t,h-1,eprima) - PTS(t,h,e)) *
escenario(h,e,eprima)) =L= rampa_baj(t);
reserva(w,h,e).. RHS(w,h,e) =E= sum(eprima, (reserva_ini(w,h) + RHS(w,h-1,eprima) -
PHS(w,h,e) - VeS(w,h,e) + aportS(w,h,e)) * escenario(h,e,eprima));
arranque(t,h,e).. XS(t,h,e) =G= sum(eprima,(ProS(t,h,e) - ProS(t,h-1,eprima)) *
escenario(h,e,eprima));
parada(t,h,e)$(ord(h)>1).. YS(t,h,e) =G= sum(eprima,(ProS(t,h-1,eprima) - ProS(t,h,e))
* escenario(h,e,eprima));
rodante(h,e).. dem(h)*reserva_rod + sum(t, PTS(t,h,e)) =L= sum(t,
pmaxT(t)*ProS(t,h,e));

```

```

FOjetivo.. ZS =E= sum(t, sum(h, b(t)*PT(t,h) + a(t)*Pro(t,h))) + sum(t, sum(h,
coste_arr(t)*X(t,h))) +
sum(t, sum(h, coste_par(t)*Y(t,h)));
demandaDet(h).. sum(t, PT(t,h)) + sum(w, PH(w,h)) =E= dem(h);
potminTDet(t,h).. PT(t,h) =G= pminT(t) * Pro(t,h);
potmaxTDet(t,h).. PT(t,h) =L= pmaxT(t) * Pro(t,h);
rsubDet(t,h).. PT(t,h) - PT(t,h-1) =L= rampa_sub(t);
rbajDet(t,h)$(ord(h)>1).. PT(t,h-1) - PT(t,h) =L= rampa_baj(t);
reservaDet(w,h).. RH(w,h) =E= reserva_ini(w,h) + RH(w,h-1) - PH(w,h) - Ve(w,h) +
aportaciones(w,h);
arranqueDet(t,h).. X(t,h) =G= Pro(t,h) - Pro(t,h-1);
paradaDet(t,h)$(ord(h)>1).. Y(t,h) =G= Pro(t,h-1) - Pro(t,h);
rodanteDet(h).. dem(h)*reserva_rod + sum(t, PT(t,h)) =L= sum(t, pmaxT(t)*Pro(t,h));

```

```

adicional(e).. Z =G= Z1.l - delta.l(e);

```

```

Option MIP = Cplex;
Option Optcr = 0;

```

```

Model Modelo_5_1

```

```

/SolEstoc,demanda,potminT,potmaxT,rsub,rbaj,reserva,arranque,parada,rodante/;
Solve Modelo_5_1 Using MIP minimizing Z1;

```

```

Z2.l = Z1.l - determinista;
Display Z2.l;

```

```

Model Modelo_5_3_det

```

```

/FOjetivo,demandaDet,potminTDet,potmaxTDet,rsubDet,rbajDet,reservaDet,arranque
Det,paradaDet,rodanteDet/;
Loop(e,
aportaciones(w,h) = tablasapor(w,h,e);
Solve Modelo_5_3_det using MIP minimizing ZS;
delta.l(e)=ZS.l;
);

```

```
Z3.l = sum(e,delta.l(e)*prob(e,'4'));  
Display Z3.l;
```

```
Z4.l = Z1.l - Z3.l;  
Display Z4.l;
```

```
Model Modelo_Adicional /adicional/;  
Solve Modelo_Adicional using MIP minimizing Z;
```

3. ANEXO DE FIGURAS

Figura 1.1.a.1.: Tabla de la potencia generada por hora en el Modelo 1.

Figura 1.1.a.2.: Tabla con el valor del agua en cada hora.

Figura 1.2.a.1.: Tabla de la potencia generada por hora en el Modelo 2.

Figura 1.2.a.2.: Tabla con el precio de producción de potencia cada hora.

Figura 1.3.a.1.: Tabla de la potencia generada por hora en el Modelo 3.

Figura 1.4.a.1.: Tabla de la potencia generada por hora en el Modelo 4.

Figura 1.5.1.: Diagrama de árbol con los distintos escenarios posibles en cada hora.