

3 MODELS D'OPTIMITZACIÓ

Un cop estudiat el comportament de les diferents unitats tèrmiques, podem procedir a la modelització, per tal de veure de quina manera han d'actuar les diferents unitats tèrmiques de manera que els seus beneficis siguin òptims.

En aquest apartat considerarem dos models diferents, el primer, és el model realitzat per F. Javier Heredia i Cristina Corchero[2]. L'altre model té com a autors Miguel Carrión i José M. Arroyo[1]. El nostre objectiu és elaborar un model combinat amb elements dels dos models i veure més endavant si és més eficient que el model Corchero-Heredia[2].

Als següents apartats, explicarem detalladament la formulació dels dos models diferents, i finalment, presentarem el model combinat. Al detall dels models explicarem:

- Els paràmetres i variables necessaris que necessitem per elaborar el model.
- L'expressió de la funció objectiu que volem optimitzar.
- La justificació de cada una de les restriccions presents al model.

3.1 Model Corchero-Heredia

El model que explicarem a continuació ha estat realitzat per F. Javier Heredia i Cristina Corchero[2]. Una de les peculiaritats d'aquest model, és que incorpora a la seva formulació un tractament per a l'energia relacionada amb el mercat de futurs. Hi han dos condicions importants que ha de satisfer el model en relació al mercat de futurs, aquestes condicions són les següents:

- Una unitat tèrmica només pot participar en un contracte de futur.
- La energia destinada als contractes de futurs ha de ser ofertada a preu zero al mercat diari.

D'altra banda, abans de començar amb el detall del model, explicarem breument alguns elements amb la finalitat de fer-nos una idea més clara a la hora de llegir el detall del model:

- Considerarem 24 períodes de temps, que corresponen a les 24 hores del dia en que s'oferta l'energia.
- Les unitats tèrmiques corresponen a les estudiades a l'anàlisi anterior.
- Per tenir en compte la incertesa del mercat diari, s'ha proposat un model de programació estocàstica amb diferents possibles escenaris⁸.

Abans de continuar, farem una breu explicació sobre el que és un escenari, i amb quina finalitat l'utilitzem. En el nostre model, tenim una variable aleatòria que és el preu de mercat de l'energia $\lambda_i^{d,s}$ per a cada període de temps (hores en el nostre cas). La idea d'aquest procés és discretitzar la funció de probabilitat d'aquesta variable aleatòria, és a dir, particionar-la en diferents parts amb la seva corresponent probabilitat. Cada una d'aquestes particions, són els anomenats escenaris, i cada un d'ells porta associada una probabilitat, que en els nostre model anomenem P^s (probabilitat de l'escenari s). Amb això aproximem una variable aleatòria contínua a una discreta, de tal forma que per

⁸ La informació referent a programació estocàstica es pot consultar al llibre descrit a la referència [7] de la bibliografia.

a cada valor de la variable estocàstica, obtenim un vector amb s valors diferents per a aquesta variable. Veiem un exemple gràfic que ens ajudarà a entendre el que acabem d'explicar:

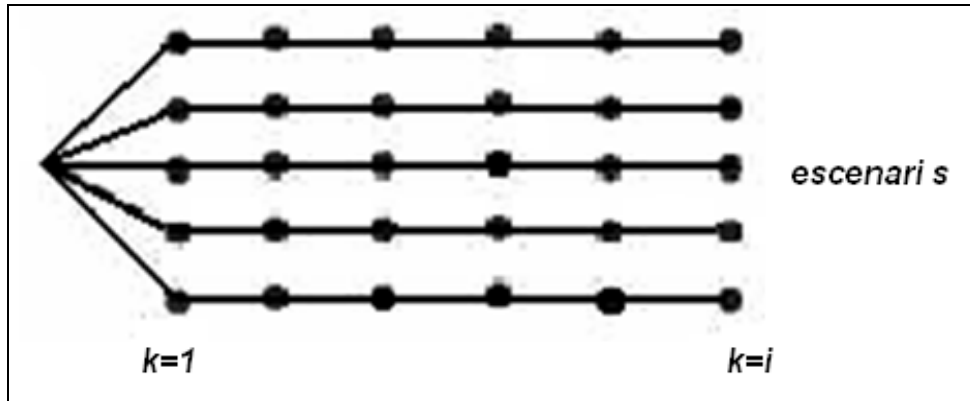


Fig. 3.1: Gràfic explicatiu dels diferents escenaris per a cada període de temps.

Com veiem, cada línia horitzontal representa un escenari diferent, i cada cercle un valor diferent de la variable aleatòria $\lambda_i^{d,s}$ per a cada període de temps. Cal dir també, que cada línia horitzontal, és a dir, cada escenari, porta associada una probabilitat P^s .⁹

3.1.1 Definició dels elements del model

A continuació dividirem els elements del model en tres grups: conjunts, paràmetres i variables.

Conjunts:

- T Conjunt de les unitats tèrmiques.
- I Conjunt dels períodes de temps.
- S Conjunt dels escenaris.
- F Conjunt dels contractes de futurs.
- U_j Conjunt de tèrmiques que poden subministrar energia al contracte de futur j .

⁹ La informació referent als escenaris i el gràfic són extrets del PFC que té com autor Albert Roso Llorach[8]

Paràmetres:

- c_t^{off} Cost d'aturada de la unitat tèrmica t. (cènt.€)
- c_t^{on} Cost d'engegada de la unitat tèrmica t. (cènt. €)
- c_t^b Cost de generació constant de la unitat tèrmica t. (cènt. €)
- c_t^l Cost de generació lineal de la unitat tèrmica t. (cènt. €/MWh)
- c_t^q Cost de generació quadràtic de la unitat tèrmica t. (cènt. €/MWh²)
- P^s Probabilitat de l'escenari s.
- \bar{P}_t Potència màxima que pot generar la unitat tèrmica t. (MW)
- \underline{P}_t Potència mínima que ha de generar la unitat tèrmica t. (MW)
- $stat_t$ Indica en períodes de temps quant porta apagada o encesa la unitat tèrmica t en el moment inicial.
- $\lambda_i^{d,s}$ Preu de mercat al període de temps i, a l'escenari s.
- L_j Potència adjudicada al contracte de futur de les unitats tèrmiques j. (MW)
- t_t^{off} Nombre de períodes que s'ha de mantenir apagada la unitat t un cop apagada.
- t_t^{on} Nombre de períodes que s'ha de mantindre encesa la unitat t un cop engegada.

Variables:

- a_{it} Variable binària igual a 1 si apaguem la unitat tèrmica t al període i. Val 0 en qualsevol altre cas.
- e_{it} Variable binària igual a 1 si encenem la unitat tèrmica t al període i. Val 0 en qualsevol altre cas.
- u_{it} Variable binària igual que mostra l'estat de la unitat tèrmica t al període i. Val 1 en cas de que estigui encesa i 0 si es troba apagada.
- p_{it}^s Energia cassada per la tèrmica t, al període de temps i, a l'escenari s. (MW)
- f_{ij} Energia generada per la tèrmica t, al període i, pel contracte de futurs j.
- q_{it} Energia ofertada a preu 0 per la unitat tèrmica t al interval de temps i.

3.1.2 Detall de la funció objectiu

La funció objectiu que proposa el model Corchero-Heredia[2] és la següent:

$$\sum_{\forall i \in I} \sum_{\forall t \in T} \left(\sum_{s \in S} P^s \left[(\lambda_i^{d,s} - c_t^l) p_{it}^s - c_t^q (p_{it}^s)^2 \right] - (c_t^{on} e_{it} + c_t^{off} a_{it} + c_t^b u_{it}) \right)$$

A l'expressió anterior podem comentar dues parts diferents, que ens ajudaran a entendre el perquè d'aquesta formulació. Degut a que el nostre objectiu és maximitzar els beneficis, és necessari tenir en compte a la funció objectiu el cost que representa a la tèrmica generar energia, i els beneficis esperats generant aquesta energia.

Considerem primer l'expressió:

$$c_t^{on} e_{it} + c_t^{off} a_{it} + c_t^b u_{it}$$

Com podem interpretar, aquesta part de la funció objectiu, té en compte el cost d'aturada o d'engegada de la unitat tèrmica t al període de temps i (si és que es dona el cas) , més el cost de generació constant de la unitat tèrmica en cas d'estar funcionant.

D'altra banda, la següent expressió ens proporciona els beneficis esperats com a conseqüència de la venda d'energia:

$$\sum_{s \in S} P^s \left[(\lambda_i^{d,s} - c_t^l) p_{it}^s - c_t^q (p_{it}^s)^2 \right]$$

Aquesta part té en compte els costos de generació lineal i quadràtics, provocats per la generació d'energia de la tèrmica t, al període de temps i, tenint en compte la probabilitat dels diferents escenaris s.

Notem que tindrem beneficis si el valor d'aquesta expressió, sumada al valor de l'anterior, té un valor positiu. Això passa degut a que el preu a que es ven l'energia resta al cost de generació lineal, i per tant significa que estariem venent energia a un preu superior al que ens costa generar-la.

Un cop detallats els paràmetres i la funció objectiu, podem passar al següent apartat, que consistirà en el detall de les constriccions del model.

3.1.3 Detall de les constriccions

A continuació anirem introduint una a una les diferents constriccions del model, amb una breu justificació de la utilització de cada una d'aquestes.

Constriccions del model:

En el nostre model, podem classificar les diferents constriccions en tres grups diferents segons el paper que tenen al model. La classificació es la següent:

- Constriccions per contractes de futur.
- Constriccions d'aturada i engegada de les unitats.
- Constriccions sobre la potència generada.

Constriccions per contractes de futur:

La següent constricció té la funció d'assegurar que es generarà la potència requerida pels contractes de futurs per les unitats tèrmiques t presents en els esmentats contractes:

$$(1) \quad \sum_{t \in U_j} f_{ij} = L_j \quad \forall i \in I, \forall j \in F$$

D'altra banda, hem de garantir que com a mínim, l'energia destinada als contractes de futur, sigui ofertada a preu 0. Això ho aconseguim amb la següent condició:

$$(2) \quad q_{it} \geq \sum_{t \in F_i} f_{ij} \quad \forall i \in I, \forall t \in T$$

Ja hem acabat el bloc de constriccions pels contractes de futurs. A continuació explicarem el següent bloc de constriccions.

Constriccions d'aturada i engegada de les unitats:

La següent constricció manté la coherència entre les variables d'aturada i engegada, amb les variables que defineixen l'estat de la unitat. Definim la constricció de la següent forma:

$$(3) \quad -u_{it} + u_{(i-1)t} - a_{it} + e_{it} = 0 \quad \forall i \in I, \forall t \in T$$

A continuació realitzarem una taula binària que demostrï com aquesta constricció es satisfà en tots els casos:

	a_{it}	e_{it}	u_{it}	$u_{(i-1)t}$	Valor final
Aturada	1	0	0	1	0
Enggada	0	1	1	0	0

Taula 3.1: Taula de valors de les variables d'estat en els casos d'aturada i engegada

Notem que, si no afegim cap restricció més, res impedeix que les variables d'aturada i engegada prenguin el valor 1 alhora. Aquesta situació faria que és satisfés la constricció (3) i és evident que això no és possible. La solució seria introduir la següent condició:

$$a_{it} + e_{it} \leq 1 \quad \forall i \in I, \forall t \in T$$

Això impedeix que les dues variables puguin prendre valor 1 al mateix període de temps. D'altra banda, no incorporarem aquesta constricció al model, ja que queda definida implícitament en les constriccions que explicarem a continuació.

Les següents constriccions tenen la funció de fer que es compleixin les condicions referents al temps mínim que les unitats han de mantenir-se aturades o enceses després d'una aturada o engegada. Això ho aconseguim amb les dos següents constriccions:

- Per l'enggada:

$$(4) \quad e_{it} + \sum_{k=i}^{\min\{i+t_i^{on}, |I|\}} a_{kt} \leq 1 \quad \forall i \in I, \forall t \in T$$

- Per l'aturada:

$$(5) \quad a_{it} + \sum_{k=i+1}^{\min\{i+t_i^{off}, |I|\}} e_{kt} \leq 1 \quad \forall i \in I, \forall t \in T$$

Si observem detalladament la constricció (4), ens adonem que el fet de que el sumatori comenci en i garanteix que les variables d'aturada i engegada no puguin valer 1 en el mateix període. D'aquesta manera s'evita afegir una constricció més al model.

Constriccions sobre la potència generada:

Les tres següents constriccions tenen com a missió complir les característiques de cada unitat tèrmica referents a la potència màxima i mínima de funcionament de cada unitat tèrmica. Les constriccions es mostren a continuació:

- La potència cassada no pot superar la potència màxima:

$$(6) \quad p_{it}^s \leq \bar{P}_t u_{it} \quad \forall i \in I, \forall t \in T, \forall s \in S$$

- La potència cassada ha de ser com a mínim igual a la potència ofertada a preu 0:

$$(7) \quad p_{it}^s \geq q_{it} \quad \forall i \in I, \forall t \in T, \forall s \in S$$

- La potència cassada ha de superar la potència mínima:

$$(8) \quad q_{it} \geq \underline{P}_t u_{it} \quad \forall i \in I, \forall t \in T$$

A l'article Corchero-Heredia[2] es demostra que el valor òptim de la variable p_{it}^s correspon a l'energia cassada si la GenCo enviés la corba d'oferta descrita a la secció 2.5 i el preu de cassació coincidís amb el preu de l'escenari s , $\lambda_i^{d,s}$. La següent gràfica il·lustra aquesta situació:

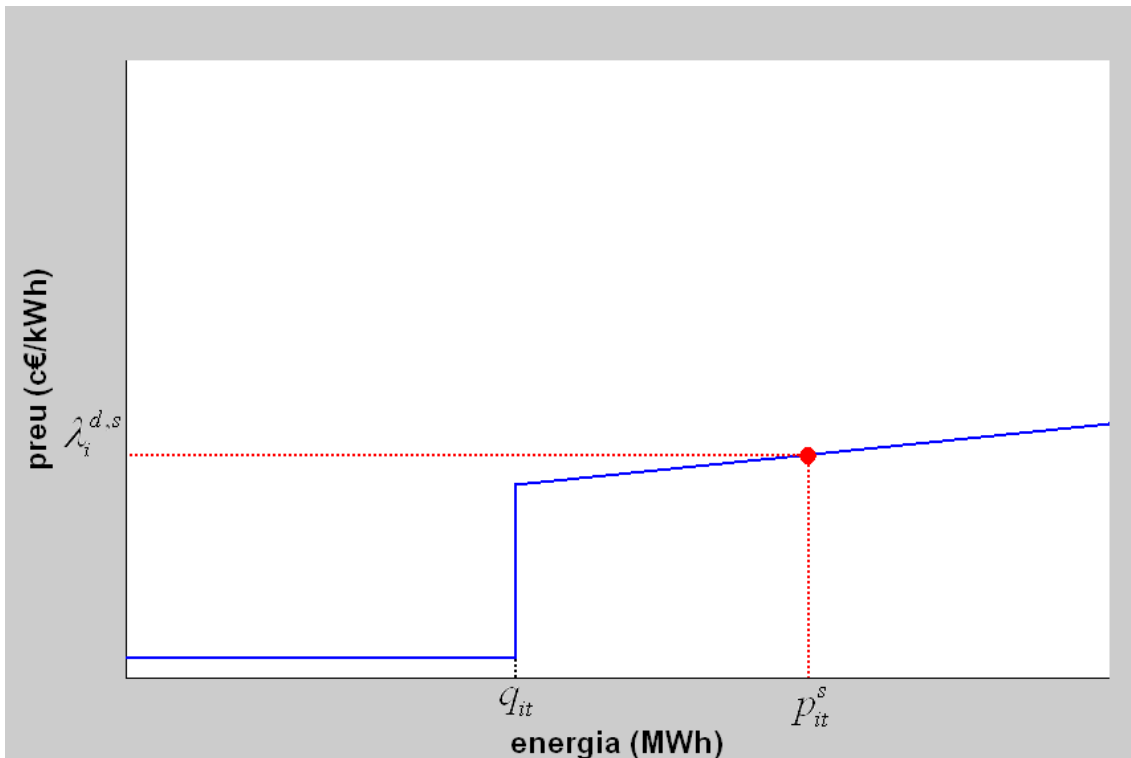


Fig. 3.2: Gràfica que mostra la relació entre la potència òptima cassada i el preu de cassació

Per últim, ens queda definir un parell de constriccions referents als dominis de les variables que encara no queden del tot definides. Les dos constriccions finals es mostren a continuació:

$$(9) \quad f_{ij} \geq 0 \quad \forall i \in I, \forall t \in T, \forall j \in F$$

$$(10) \quad u_{it}, a_{it}, e_{it} \in \{0,1\} \quad \forall i \in I, \forall t \in T$$

Un cop hem definit i explicat totes les constriccions del model, veurem a continuació la formulació completa del model.

$$\text{Maximiztar } \sum_{\forall i \in I} \sum_{\forall t \in T} \left(\sum_{s \in S} P^s \left[(\lambda_i^{d,s} - c_i^l) p_{it}^s - c_i^q (p_{it}^s)^2 \right] - (c_i^{on} e_{it} + c_i^{off} a_{it} + c_i^b u_{it}) \right)$$

Subjecte a:

$$(1) \sum_{t \in U_j} f_{ij} = L_j \quad \forall i \in I, \forall j \in F$$

$$(2) q_{it} \geq \sum_{t \in F_i} f_{ij} \quad \forall i \in I, \forall t \in T$$

$$(3) -u_{it} + u_{(i-1)t} - a_{it} + e_{it} = 0 \quad \forall i \in I, \forall t \in T$$

$$(4) e_{it} + \sum_{k=i}^{\min\{i+t_r^{on}, |I|\}} a_{kt} \leq 1 \quad \forall i \in I, \forall t \in T$$

$$(5) a_{it} + \sum_{k=i+1}^{\min\{i+t_r^{off}, |I|\}} e_{kt} \leq 1 \quad \forall i \in I, \forall t \in T$$

$$(6) p_{it}^s \leq \bar{P}_t u_{it} \quad \forall i \in I, \forall t \in T, \forall s \in S$$

$$(7) p_{it}^s \geq q_{it} \quad \forall i \in I, \forall t \in T, \forall s \in S$$

$$(8) q_{it} \geq \underline{P}_t u_{it} \quad \forall i \in I, \forall t \in T$$

$$(9) f_{ij} \geq 0 \quad \forall i \in I, \forall t \in T, \forall j \in F$$

$$(10) \quad u_{it}, a_{it}, e_{it} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in I, \forall t \in T$$

3.2 Model Carrión

Aquest model ha estat realitzat per Miguel Carrión i José M. Arroyo[1]. A diferència del model Corchero-Heredia[2], aquest model no incorpora una formulació extra per la part de contractes de futurs.

D'altra banda, incorpora una formulació diferent per a les constriccions referents a l'estat de la unitat. En concret, elimina les variables d'aturada i engegada de les unitats, i formula el model únicament amb les variables d'estat de la unitat. També introdueix unes modificacions relacionades amb els costos d'aturada i engegada de les unitats, que explicarem més endavant.

El que farem no serà explicar el model complet, sinó explicar els elements d'aquest model que utilitzarem per fer les modificacions al model combinat que utilitzarem per fer les comparacions amb el primer model.

3.2.1 Definició dels elements del model

Variables:

c_{it}^u Cost que provoca la posada en marxa de la unitat t al període i . (€)

c_{it}^d Cost que provoca l'apagament de la unitat t al període i . (€)

Paràmetres:

L_t Períodes de temps des del moment inicial que la unitat t ha d'estar apagada.

G_t Períodes de temps des del moment inicial que la unitat t ha d'estar encesa.

Aquests són els elements que incorpora el nou model. Com veiem, no hi ha pràcticament cap diferència amb l'anterior en aquest aspecte. On veurem les

diferències més significatives serà a la hora de formular les constriccions del model.

Abans de continuar, cal dir també que aquest model no incorpora les variables d'aturada i engegada, ja que planteja una formulació diferent utilitzant únicament les variables d'estat de la unitat.

3.2.2 Detall de la funció objectiu:

Pel que fa a la funció objectiu, no hi ha diferències llevat dels canvis provocats per la eliminació de les variables d'engegada i aturada. Degut a l'eliminació de les esmentades variables, hem de substituir-les per les noves variables que hem introduït a aquest model, que tenen en compte el cost d'aturada i engegada. La resta de termes de la funció objectiu es mantenen igual. Per tant podem expressar-la de la següent manera:

$$\sum_{\forall i \in I} \sum_{\forall t \in T} \left(\sum_{s \in S} P^s \left[(\lambda_i^{d,s} - c_i^l) p_{it}^s - c_i^q (p_{it}^s)^2 \right] - (c_{it}^u + c_{it}^d + c_i^b u_{it}) \right)$$

Com podem veure, aquesta expressió es veu mínimament afectada pels canvis en el model. Ara al següent apartat detallarem les constriccions, on si que apreciarem canvis significatius.

3.2.3 Detall de les constriccions

En aquest apartat, detallarem les constriccions que substituiran a algunes constriccions de l'anterior model, més en concret substituiran a les constriccions d'aturada i engegada del model Corchero-Heredia[2]. Dividirem les constriccions en dos blocs:

- Constriccions de cost d'aturada i engegada.
- Constriccions d'aturada i engegada.

Constriccions de cost d'aturada i engegada:

Les següents constriccions tenen la funció de guardar a les variables de costos, la despesa provocada per les aturades i posades en marxa de les diferents unitats tèrmiques. Les constriccions són les següents:

- Posada en marxa:

$$(1) \quad c_{it}^u \geq c_t^{on} [u_{it} - u_{(i-1)t}] \quad \forall i \in I, \forall t \in T$$

- Aturada:

$$(2) \quad c_{it}^d \geq c_t^{off} [u_{(i-1)t} - u_{it}] \quad \forall i \in I, \forall t \in T$$

- Condició de positivitatz:

$$(3) \quad c_{it}^u \geq 0 \quad \forall i \in I, \forall t \in T$$

$$(4) \quad c_{it}^d \geq 0 \quad \forall i \in I, \forall t \in T$$

Com podem observar a les constriccions (1) i (2), les variables de despesa sempre prendran el valor cost d'aturada o cost d'engegada, depenent de si es produeix o no aquest esdeveniment. En cas de no produir-se, podrien prendre un valor negatiu, per tant s'introdueixen les constriccions (3) i (4) per tal d'assegurar-nos que el cost sigui zero en cas de no produir-se cap aturada ni engegada. D'altra banda, degut a la forma en que les anteriors variables apareixen a la funció objectiu, sempre prendran el mínim valor permès per l'anterior grup de constriccions.

Constriccions d'aturada i engegada:

El parell de constriccions que introduïrem a continuació assegurin que les unitats tèrmiques es mantinguin apagades o enceses el temps obligatori partint del moment inicial. Recordem que G_t i L_t són els períodes de temps durant els quals la unitat t ha de romandre encesa o apagada respectivament. La formulació és la següent:

$$(5) \quad \sum_{k=1}^{G_t} (1 - u_{it}) = 0 \quad \forall t \in T$$

$$(6) \quad \sum_{i=1}^{L_t} u_{it} = 0 \quad \forall t \in T$$

Ara introduïrem les restriccions que tenen com a funció assegurar que les tèrmiques compleixin els temps obligatoris d'aturada o engegada, un cop es produeixi algun d'aquests esdeveniments:

$$(7) \quad \sum_{n=i}^{i+t_t^{on}-1} u_{it} \geq t_t^{on} [u_{it} - u_{(i-1)t}] \quad \forall t \in T, \forall i = G_t + 1 \cdots |I| - t_t^{on} + 1$$

$$(8) \quad \sum_{n=i}^{i+t_t^{off}-1} [1 - u_{nt}] \geq t_t^{off} [u_{(i-1)t} - u_{it}] \quad \forall t \in T, \forall i = L_t + 1 \cdots |I| - t_t^{off} + 1$$

Per últim, les següents restriccions modelitzen els períodes finals $t_t^{on} - 1$ i $t_t^{off} - 1$, per assegurar que la unitat es manté encesa o apagada fins al final del temps:

$$(9) \quad \sum_{n=i}^{|I|} \left\{ u_{nt} - [u_{it} - u_{(i-1)t}] \right\} \geq 0 \quad \forall t \in T, \forall i = |I| - t_t^{on} + 2 \cdots |I|$$

$$(10) \quad \sum_{n=i}^{|I|} \left\{ 1 - u_{nt} - [u_{(i-1)t} - u_{it}] \right\} \geq 0 \quad \forall t \in T, \forall i = |I| - t_t^{off} + 2 \cdots |I|$$

Ara que hem explicat els elements del model Carrión-Arroyo[1] que introduïrem al model combinat passarem al següent apartat, on mostrarem el model combinat amb el qual farem la comparativa final amb el model Corchero-Heredia[2].

3.3 Model combinat

Aquest model serà el que utilitzarem definitivament per a realitzar les comparacions amb el model Corchero-Heredia[2]. Com hem explicat anteriorment, incorpora una formulació combinada dels dos models explicats anteriorment. El que farem a continuació serà explicar què és el que incorpora exactament de cada model per tenir una idea clara de com és la seva formulació final.

3.3.1 Detall de les modificacions introduïdes

Funció objectiu:

La funció a maximitzar del model combinat és la corresponent al model Carrión-Arroyo[1], ja que és la que incorpora les dos variables de costos explicades al model anterior.

Constriccions:

- **Constriccions de potència generada:** Aquest bloc estarà representat pel grup de constriccions (6), (7), (8) i (9) del model Corchero-Heredia[2].
- **Constriccions per contractes de futur:** Com que l'únic model que formula aquest bloc és el primer, a aquest bloc constaran les constriccions (1) i (2) del primer model.
- **Constriccions d'estat de les unitats:** És en aquest bloc on desapareix la formulació del primer model i introduïm íntegrament la formulació detallada al model Carrión[1]. Per tant, les constriccions que introduïrem a aquest apartat seran les constriccions (1)-(10) del segon model.

Un cop explicades les modificacions, passarem a formular clarament el model final que utilitzarem com a comparativa.

3.3.2 Formulació del model final

$$\text{Maximitzar } \sum_{\forall i \in I} \sum_{\forall t \in T} \left(\sum_{s \in S} P^s \left[(\lambda_i^{d,s} - c_t^l) p_{it}^s - c_t^q (p_{it}^s)^2 \right] - (c_{it}^u + c_{it}^d + c_t^b u_{it}) \right)$$

$$(1) \quad \sum_{i \in U_j} f_{ij} = L_j \quad \forall i \in I, \forall j \in F$$

$$(2) \quad q_{it} \geq \sum_{i \in F_t} f_{ij} \quad \forall i \in I, \forall t \in T$$

$$(3) \quad p_{it}^s \leq \bar{P}_t u_{it} \quad \forall i \in I, \forall t \in T, \forall s \in S$$

$$(4) \quad p_{it}^s \geq q_{it} \quad \forall i \in I, \forall t \in T, \forall s \in S$$

$$(5) \quad q_{it} \geq \underline{P}_t u_{it} \quad \forall i \in I, \forall t \in T$$

$$(6) \quad c_{it}^u \geq c_t^{on} [u_{it} - u_{(i-1)t}] \quad \forall i \in I, \forall t \in T$$

$$(7) \quad c_{it}^d \geq c_t^{off} [u_{(i-1)t} - u_{it}] \quad \forall i \in I, \forall t \in T$$

$$(8) \quad \sum_{k=1}^{G_t} (1 - u_{it}) = 0 \quad \forall t \in T$$

$$(9) \quad \sum_{i=1}^{L_t} u_{it} = 0 \quad \forall t \in T$$

$$(10) \quad \sum_{n=i}^{i+t_t^{on}-1} u_{it} \geq t_t^{on} [u_{it} - u_{(i-1)t}] \quad \forall t \in T, \forall i = G_t + 1 \cdots |I| - t_t^{on} + 1$$

$$(11) \quad \sum_{n=i}^{i+t_t^{off}-1} [1 - u_{nt}] \geq t_t^{off} [u_{(i-1)t} - u_{it}] \quad \forall t \in T, \forall i = L_t + 1 \cdots |I| - t_t^{off} + 1$$

$$(12) \quad \sum_{n=i}^{|I|} \left\{ u_{nt} - [u_{it} - u_{(i-1)t}] \right\} \geq 0 \quad \forall t \in T, \forall i = |I| - t_t^{on} + 2 \cdots |I|$$

$$(13) \quad \sum_{n=i}^{|I|} \left\{ 1 - u_{nt} - [u_{(i-1)t} - u_{it}] \right\} \geq 0 \quad \forall t \in T, \forall i = |I| - t_t^{off} + 2 \cdots |I|$$

$$(14) \quad c_{it}^u, c_{it}^d \geq 0 \quad \forall i \in I, \forall t \in T$$

$$(15) \quad f_{ij} \geq 0 \quad \forall i \in I, \forall t \in T, \forall j \in F$$

$$(16) \quad u_{it} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in I, \forall t \in T$$

4 RESOLUCIÓ DELS MODELS AMB AMPL

En aquest apartat ens ocuparem de la resolució dels dos models que volem comparar. El software utilitzat per resoldre aquests models d'optimització ha estat AMPL[3], en concret la versió professional AMPL10.0. Al següent apartat explicarem la funció i el contingut de cada un dels fitxers necessaris per a la resolució del problema.

4.1 Detall dels arxius AMPL (*.mod,*.run,*.dat)

4.1.1 Arxiu *.mod¹⁰

La funció d'aquest arxiu és definir tant la funció objectiu, com les constriccions que conformen el nostre model. Cada model té associat un nom d'arxiu de la següent manera:

- Model Corchero-Heredia: *CorHer.mod*.
- Model combinat: *combinat.mod*.

4.1.2 Arxiu *.run

Aquest fitxer és l'encarregat entre altres coses, de cridar als fitxers *.dat i *.mod que resoldran el model. En aquest arxiu també declararem tots els elements del model que utilitzarem per resoldre'l, ja siguin paràmetres, variables, constriccions o funció objectiu.

En aquest arxiu especificuem quin resolutor utilitzem (en el nostre cas serà el CPLEX) i més endavant especificarem quines sortides volem que ens proporcionin el model. En el nostre cas demanarem les sortides de totes les variables del model per veure quins valors prenen.

Els noms d'aquest fitxers seran els mateixos que en els fitxers *.mod canviant l'extensió a *.run.

¹⁰ Tant els arxius necessaris per solucionar els models, com les sortides corresponents a les solucions òptimes, es troben als annexos.

4.1.3 Arxiu *.dat

A aquest fitxer tenim guardades totes les dades que necessitem per resoldre el nostre model, és a dir, tots els paràmetres. Les dades que figuren a aquest arxiu han estat proporcionades majoritàriament pel departament d'estadística i investigació operativa. Una altra part d'aquestes dades han estat estimades per nosaltres tal i com hem explicat en apartats anteriors.

Els noms d'aquests fitxers són iguals que els anteriors però amb extensió *.dat. Un cop definits tots els fitxers, podem procedir a executar el fitxers *.run corresponents a cada model i analitzar la seva solució òptima.

4.2 Solució model Corchero-Heredia

La solució que mostrarem a continuació correspon a l'execució del model amb 150 escenaris. El que farem a continuació serà mostrar les sortides referents a la solució òptima del model i comentar-la breument.¹¹

Variables d'estat de la unitat:

	ALL1	ROB1	ROB2	NRC1	NRC2	NRC3	SBO2	SBO1
1	1	0	0	0	1	1	1	1
2	1	0	0	0	1	1	1	1
3	1	0	0	0	1	1	1	1
4	1	0	0	0	1	1	1	1
5	1	0	0	0	1	1	1	1
6	1	0	0	0	1	1	1	1
7	1	0	0	0	1	1	1	1
8	1	0	0	0	1	1	1	1
9	1	0	0	0	1	1	1	1
10	1	0	0	0	1	1	1	1
11	1	0	0	0	1	1	1	1
12	1	0	0	0	1	1	1	1
13	1	0	0	0	1	1	1	1
14	1	0	0	0	1	1	1	1
15	1	0	0	0	1	1	1	1
16	1	0	0	0	1	1	1	1
17	1	0	0	0	1	1	1	1
18	1	0	0	0	1	1	1	1
19	1	0	0	0	1	1	1	1
20	1	1	0	0	1	1	1	1
21	1	1	0	0	1	1	1	1
22	1	1	0	0	1	1	1	1
23	1	1	0	0	1	1	1	1
24	1	1	0	0	1	1	1	1

Taula 4.1: Taula òptima d'estat de les unitats tèrmiques

Com podem veure, les unitats ALL1, NRC2, NRC3, SBO2 i SBO1 es mantenen en funcionament les 24 hores del dia. En canvi, les unitats ROB2 i NRC1 mai es posen en funcionament. La unitat ROB1 es manté apagada fins les 19 hores per posar-se en marxa de 20 a 24 hores.

Contractes de futur:

¹¹ Totes les execucions han estat realitzades amb un computador Intel Core Duo, amb una CPU de 3Ghz a 2,99 Gb de memòria RAM.

Tenim 3 contractes bilaterals als quals hem de proporcionar la següent quantitat d'energia:

Contracte	Energia	Unitats participants
1	200	ALL1, ROB1, ROB2
2	500	NRC1, NRC2, NRC3
3	500	SBO1, SBO2

Taula 4.2: Dades de l'energia demandada a cada grup d'unitats pels contractes

	Contracte 1			Contracte 2			Contracte 3	
	ALL1	ROB1	ROB2	NRC1	NRC2	NRC3	SBO2	SBO1
1	200	0	0	0	364.1	135.9	186.4	313.6
2	200	0	0	0	364.1	135.9	186.4	313.6
3	200	0	0	0	364.1	135.9	186.4	313.6
4	200	0	0	0	364.1	135.9	186.4	313.6
5	200	0	0	0	364.1	135.9	186.4	313.6
6	200	0	0	0	364.1	135.9	186.4	313.6
7	200	0	0	0	364.1	135.9	186.4	313.6
8	200	0	0	0	364.1	135.9	186.4	313.6
9	200	0	0	0	364.1	135.9	186.4	313.6
10	200	0	0	0	364.1	135.9	186.4	313.6
11	200	0	0	0	364.1	135.9	186.4	313.6
12	200	0	0	0	364.1	135.9	186.4	313.6
13	200	0	0	0	364.1	135.9	186.4	313.6
14	200	0	0	0	364.1	135.9	186.4	313.6
15	200	0	0	0	364.1	135.9	186.4	313.6
16	200	0	0	0	364.1	135.9	186.4	313.6
17	200	0	0	0	364.1	135.9	186.4	313.6
18	200	0	0	0	364.1	135.9	186.4	313.6
19	200	0	0	0	364.1	135.9	186.4	313.6
20	160	40	0	0	364.1	135.9	186.4	313.6
21	160	40	0	0	364.1	135.9	186.4	313.6
22	160	40	0	0	364.1	135.9	186.4	313.6
23	160	40	0	0	364.1	135.9	186.4	313.6
24	160	40	0	0	364.1	135.9	186.4	313.6

Taula 4.3: Energia que ha de produir cada unitat per satisfer els contractes bilaterals

Com veiem, per a cada hora del dia es satisfà la potència demandada per a cada contracte. Hem de veure que la suma de les energies produïdes per cada unitat present a cada contracte és igual a l'energia requerida per contracte.

Funció objectiu:

El valor de la funció objectiu és igual a -880922 €. Amb 150 escenaris, el temps total d'execució ha estat 88,9688 segons. El fet que la funció objectiu ens proporcioni un valor negatiu, podria fer-nos pensar que significa que tenim unes pèrdues iguals a aquest valor. Això no és cert, ja que ens falta saber els beneficis que obté l'empresa derivats de l'energia generada per satisfer els contractes bilaterals. Per tant, aquest valor negatiu és degut a que l'energia que es genera pels contractes bilaterals suposa un cost a l'empresa, i degut al desconeixement dels ingressos degut a aquests contractes, no podem saber amb seguretat si realment l'empresa perd o guanya diners.

4.3 Solució model combinat

En aquest cas, no presentarem altre cop els resultats de l'execució, ja que els resultats òbviament han de ser iguals degut a que estem optimitzant el mateix però de maneres diferents. L'únic cas en que les solucions podrien no convergir és que ens trobéssim en un cas amb òptims alternatius, encara que no es el nostre cas. De totes formes, també hem executat aquests fitxers i hem comprovat que, evidentment, les solucions coincidien.

Per tant el que farem a continuació serà fer proves amb els dos models per poder realitzar una taula comparativa per veure com varia el temps d'execució de cada model modificant el número d'escenaris.

4.4 Comparativa dels dos models

A continuació mostrarem una taula resum de les execucions realitzades amb diferents escenaris, per veure les variacions entre models per discutir si són significatives o no.

nº escenaris	nº de variables		nº de constriccions	
	CorHer	combinat	CorHer	combinat
10	3200	3216	7248	7056
20	5120	5136	13488	13296
30	7040	7056	19728	19536
40	8960	8976	25968	25776
50	10880	10896	32208	32016
75	15680	15696	47808	47616
100	20480	20496	63408	63216
150	30080	30096	94608	94416
200	39680	39696	121808	121616
225	44480	44496	141408	141216
250	49280	49296	157008	156816
275	54080	54096	172608	172416

Taula 4.4: Taula comparativa del nombre de variables i constriccions dels dos models

nº escenaris	temps d'execució (segons)		% de millora de temps	funció objectiu (€)
	CorHer	combinat		
10	0,890625	0,734375	17,54%	-861532
20	2,39062	1,95312	18,30%	-882181
30	4,28125	3,67188	14,23%	-881154
40	6,26562	4,95312	20,95%	-882810
50	8,29688	6,46875	22,03%	-880131
75	16,2656	13,0156	19,98%	-881305
100	23,4688	18,4688	21,30%	-881073
150	41,1094	37,7656	8,13%	-880922
200	61,7031	54,5469	11,60%	-882579
225	86,7188	67,0469	22,68%	-883609
250	106,672	74,7969	29,88%	-883783
275	115,844	91,6562	20,88%	-885048
Promig:			18,96%	

Taula 4.5: Taula comparativa del temps d'execució i valor de la funció objectiu

Pel que fa al nombre de variables, el model combinat sempre presenta 16 variables més. Aquest nombre superior de variables es manté constant independentment del nombre d'escenaris. D'altra banda, si ens fixem en les constriccions, veiem que és al revés, és a dir, el primer model presenta més constriccions que el model combinat. Per ser més exactes, el model combinat té 192 constriccions menys que el primer model i també es independent del nombre d'escenaris. Això ni significa que d'entrada, un model tingui més o menys variables o constriccions que l'altre. De fet, els dos models tenen el mateix nombre de constriccions i de variables. Aquesta diferència és deguda a una pre-solució que realitza AMPL[3] i que fa una primera eliminació d'elements redundants.

Pel que fa al temps d'execució, veiem que el model combinat en tots els casos és més ràpid que el primer model, i tal com observem a la taula anterior, la millora en promig respecte al model Corchero-Heredia[2] és del 18,96%. A continuació veiem de manera gràfica aquesta relació:

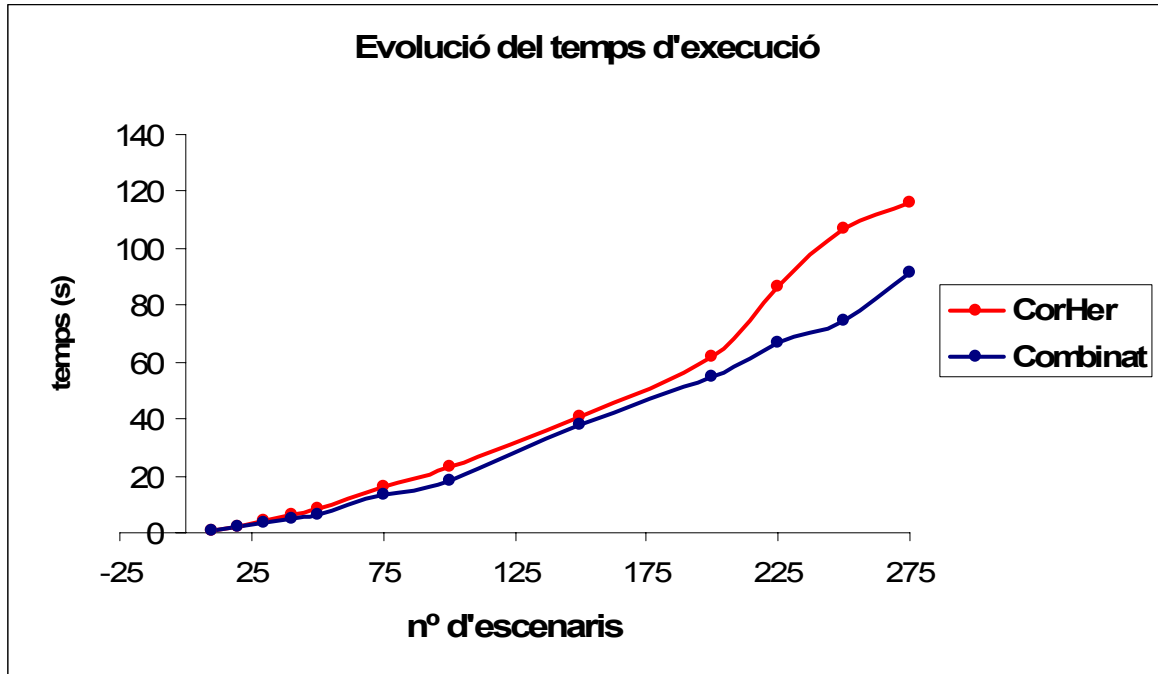


Fig. 4.1: Gràfic que mostra el temps d'execució de cada model per a diferent nº d'escenaris

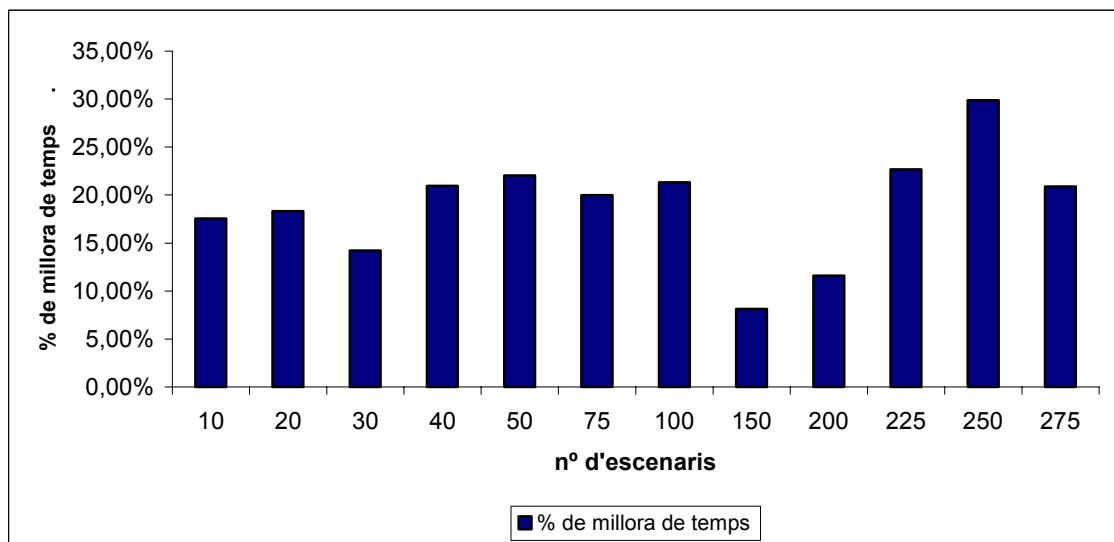


Fig. 4.2: Gràfic que mostra el percentatge de millora de temps del model combinat