

# Diplomatura d'Estadística

---

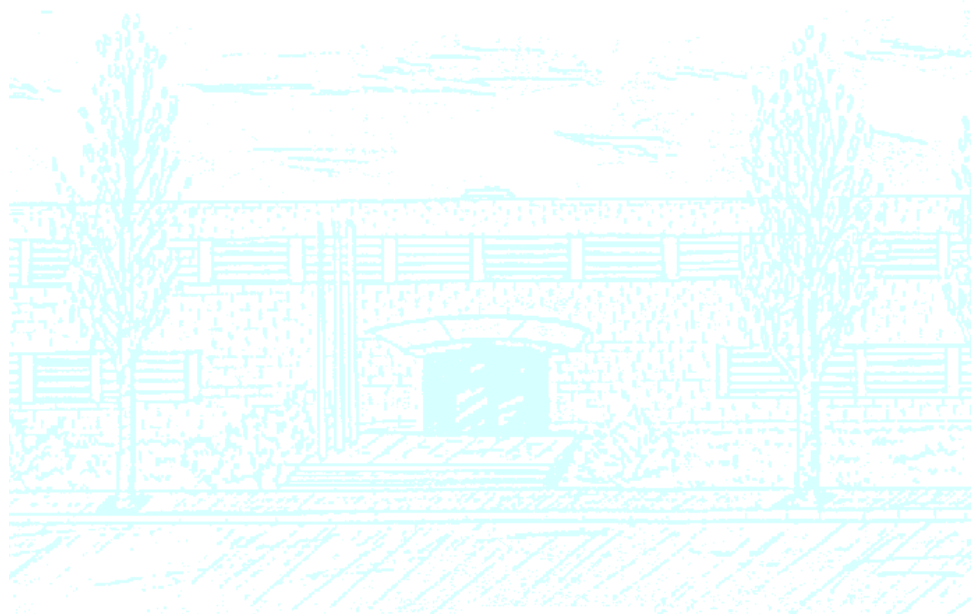
**Títol: Estudi i optimització de l'oferta al Mercat Ibèric  
d'Electricitat (MIBEL)**

**Autor: Silvia Nieto Prades; Iván Ruz Ruz**

**Director: Francisco Javier Heredia Cervera**

**Departament: Departament d'Estadística i Investigació  
Operativa**

**Convocatòria: Juny 2009**



Facultat de Matemàtiques  
i Estadística

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA



# Índex

<b>Agraïments</b> .....	<b>3</b>
<b>1. Introducció</b> .....	<b>4</b>
1.1 Context i motivació.....	5
1.2 Objectius.....	6
1.3 Software.....	7
1.4 Organització de la memòria.....	8
1.5 Conceptes bàsics sobre el funcionament del mercat elèctric.....	9
1.6.1 Mercat diari.....	9
1.6.2 Mercat de futurs.....	11
<b>2. Extracció i anàlisi de les dades</b> .....	<b>13</b>
2.1 Introducció.....	13
2.2 Extracció de dades.....	14
2.2.1 Descàrrega dels fitxers.....	14
2.2.2 Formatat dels fitxers de dades.....	15
2.2.3 Creació de taules en format Access.....	16
2.2.4 Creació de les consultes Access i conversió de fitxers a *.txt.....	17
2.2.5 Conversió dels fitxers *.txt a format Matlab *.m.....	17
2.2.6 Generació dels fitxers referents als contractes bilaterals.....	18
2.2.7 Dades extretes del full de càlcul I90DIA26.....	18
2.2.8 Dades extretes del full de càlcul I90DIA27.....	18
2.3 Generació de gràfiques amb Matlab.....	19
2.3.1 Gràfica de la corba d'oferta.....	19
2.3.1.1 Paràmetres.....	19
2.3.1.2 Contractes bilaterals.....	21
2.3.2 Gràfica de les pendents.....	21
2.4 Anàlisi descriptiu de les dades.....	21
2.4.1 Unitat tèrmica ALL1.....	22
2.4.2 Unitat tèrmica ROB2.....	31
2.5 Càlcul dels costos.....	46

<b>3. Models d'optimització.....</b>	<b>50</b>
3.1 Model Corchero-Heredia.....	51
3.1.1 Definició dels elements del model.....	52
3.1.2 Detall de la funció objectiu.....	54
3.1.3 Detall de les constriccions.....	55
3.2 Model Carrión.....	60
3.2.1 Definició dels elements del model.....	60
3.2.2 Detall de la funció objectiu.....	61
3.2.3 Detall de les constriccions.....	61
3.3 Model combinat.....	64
3.3.1 Detall de les modificacions introduïdes.....	64
3.3.2 Formulació del model final.....	65
<b>4. Resolució dels models d'optimització amb AMPL.....</b>	<b>66</b>
4.1 Detall dels arxius AMPL (*.mod,*.run,*.dat).....	66
4.1.1 Arxiu *.mod.....	66
4.1.2 Arxiu *.run.....	66
4.1.3 Arxiu *.dat.....	67
4.2 Solució model Corchero-Heredia.....	68
4.3 Solució model combinat.....	70
4.4 Comparativa dels dos models.....	70
<b>5. Conclusions.....</b>	<b>73</b>
<b>Bibliografia.....</b>	<b>75</b>
<b>Annex 1: Arxius i fitxers de dades de la memòria.....</b>	<b>76</b>
<b>Annex 2: Fitxers de la implementació en AMPL.....</b>	<b>77</b>

## **Agraïments**

Aquest projecte no s'hagués pogut portar a terme sense l'ajuda del grup de recerca GNOM, els quals ens han facilitat tota la informació.

També, agraïm la col·laboració als autors dels articles en els quals es basa aquest projecte, els doctors Javier Heredia, Miguel Carrión i José M. Arroyo, i per últim a Cristina Corchero, alumna de doctorat. Fem un esment especial dels dos primers autors, ja que per una banda la Cristina Corchero, a més a més, ens ha facilitat les dades que hem necessitat i ha estat disposada per a qualsevol aclariment d'aquestes. D'altra banda, Javier Heredia, ha estat el nostre tutor del projecte i ha fet el seu treball amb molta diplomàcia.

No ens oblidem de la Glòria Casanellas, col·laboradora de suport a la recerca del grup GNOM, que va començar aquest projecte amb nosaltres encara que després va marxar, però ha estat a la nostra disposició durant tot el procés. Va ser ella la que ens va explicar el inici del projecte i ens va proporcionar els fitxers necessaris.

Per últim, volem agrair a les nostres respectives famílies per haver-nos permet arribar fins aquí, ja que sense els seus ànims, suport econòmic, etc... avui no seríem apunt de diplomar-nos.

Gràcies a tots, ja que cadascú de vosaltres ha aportat una part important que ha fet possible l'elaboració d'aquest projecte.

# 1 INTRODUCCIÓ

Encara que no ens adonem, tots els dies es compra i es ven energia en diversos mercats d'electricitat de les diferents companyies elèctriques.

Si ens posem en la pell d'aquestes últimes veiem que estudiar l'oferta òptima per la qual vendran la seva energia, pot comportar millores espectaculars als seus beneficis. No és fàcil saber fins quan pots augmentar el preu d'oferta de l'electricitat sense quedar fora del mercat, ja que hi han altres companyies elèctriques que també busquen l'oferta òptima i per tant, són competidores. És aquí quan necessitem models d'optimització per trobar la nomenada **oferta òptima**.

En el present projecte final de carrera, veurem diferents models d'optimització que ens proporcionaran l'oferta òptima d'una companyia elèctrica, en el nostre cas d'Unión Fenosa, tenint en compte que hi han altres companyies que també oferten energia i que no ens podem quedar fora del mercat. Finalment compararem els models per veure quin és més eficient.

## 1.1 Context i motivació

El Mercat Ibèric de l'Electricitat (MIBEL) és el resultat de la integració dels mercats de l'electricitat espanyols i portuguesos. El MIBEL dona lloc a la creació dels operadors del mercat, l'OMEL (Operador del Mercat Ibèric d'Espanya), que serà l'encarregat de gestionar els mercats físics d'energia (diari, intradiari, etc), i el OMIP (Operador Ibèric de Portugal) que gestiona els mercats de derivats sobre l'energia elèctrica.

Les companyies productores d'energia elèctrica han de realitzar diàriament ofertes econòmiques per a vendre la seva electricitat mitjançant el mercat majorista, organitzat per l'Operador del Mercat Elèctric (OMEL). Les ofertes es creuen amb les demandes de compra realitzades per les companyies comercialitzadores, les distribuïdores i alguns grans consumidors. OMEL és el que selecciona quin conjunt d'ofertes de compra i de venda s'accepten, procediment que s'anomena cassació.

Donat que en un mateix dia es porten a terme diversos mercats, una companyia elèctrica ofereix diverses ofertes. Un dels mercats on es duen a terme una gran part de les transaccions és el Mercat Diari. Un altre mercat important encara que amb unes característiques diferents a l'anterior és el Mercat de Futurs.

Els models d'optimització emprats integren aquests dos mercats per tal d'optimitzar la funció d'oferta i obtenir el benefici màxim.

## 1.2 Objectius

A continuació detallarem els principals objectius a adquirir en aquest projecte.

Així, doncs, com a objectius preliminars tenim:

- Conèixer i entendre el Mercat Ibèric Elèctric.
- Comprendre com funcionen i les transaccions que es duen a terme en els principals mercats, en particular, el Mercat Diari i el Mercat de Futurs.
- Familiaritzar-nos amb el llenguatge AMPL per tal de poder fer les implementacions necessàries.
- Aprendre a utilitzar el programa Matlab per dur a terme la descriptiva de les unitats tèrmiques.

Un cop hem assolit els objectius anteriors, ja podem centrar-nos ens el objectius principals:

- Fer una descriptiva de les dades obtingudes de les ofertes de venda d'un conjunt de centrals tèrmiques per veure el comportament que tenen.
- Entendre el model d'optimització d'oferta presentat a l'article de Carrión-Arroyo[1], i comprendre la seva implementació.
- Entendre el model d'optimització d'oferta de l'article de Corchero-Heredia[2] i resoldre una nova modelització adaptant aquest model a l'anterior fent els canvis pertinents.
- Comparar els dos models i treure'n conclusions sobre quin és el més eficient.



## 1.3 Software

Com ja hem comentat a l'apartat anterior per tal d'implementar els models d'optimització necessitem fer-ho amb *AMPL: A modeling Language For Mathematical Programming*[3]. AMPL és un llenguatge de modelat algebraic per a la programació matemàtica, capaç d'expressar en notació algebraica problemes d'optimització, tant lineals o no lineals com de programació entera.

Amb aquest llenguatge es defineixen tres tipus d'arxius:

- `.mod`: descriu el model algebraic: conjunts, paràmetres, variables, funció objectiu i constriccions.
- `.dat`: es descriuen les dades dels conjunts i paràmetres a utilitzar en l'execució del fitxer `.mod`.
- `.run`: descriu el model a executar mitjançant el `.mod`, també les dades que utilitzarà mitjançant el `.dat`, i a més a més, el resolutor a utilitzar i les rutines i especificacions per tal de configurar les execucions a realitzar.

Un cop tenim el model implementat en AMPL[3], aquest ens permet utilitzar diferents resolutors com CPLEX[4], MINOS[5] o SNOPT<sup>1</sup> entre d'altres. El *solver* utilitzat es tria en funció de les característiques del model. Nosaltres hem utilitzat el resolutor CPLEX ja que aquest ens permet solucionar problemes lineals mixtes o purs amb funció objectiu lineal o quadràtica.

D'altra banda també ens hem familiaritzat amb Matlab<sup>2</sup>. Aquest és un llenguatge de computació tècnica d'alt nivell i un entorn interactiu per al desenvolupament d'algoritmes, visualització de dades, anàlisi de dades i càlcul numèric. Nosaltres l'hem fet servir per a les representacions gràfiques de les dades de les unitats tèrmiques.

---

<sup>1</sup> CPLEX, MINOS i SNOPT són paquets informàtics per resoldre problemes d'optimització a gran escala.

<sup>2</sup> La versió de Matlab que hem utilitzat en aquest projecte és: MATLAB 7.5.0 (R2007b).

## 1.4 Organització de la memòria

La memòria està estructurada en cinc capítols.

El primer capítol, aquest, és una mena d'introducció on es presenta el context del projecte i es recullen els objectius principals. A l'últim apartat d'aquest capítol tenim una descripció de com funcionen els mercats elèctrics que es tracten en aquest projecte.

El segon capítol tracta sobre l'anàlisi descriptiva de les dades. Descriu tot el procés de recollida de dades fins que obtenim uns gràfics que ens permeten veure el comportament de les unitats tèrmiques d'Unión Fenosa. Després també detalla el càlcul d'uns coeficients que necessitem per a la modelització.

El tercer capítol presenta de forma detallada els dos models d'optimització (per separat) que es tracten en aquest projecte i també la combinació d'aquest dos. En primer lloc es descriuen els elements del model per tenir clar què representen totes les variables i constants. Seguidament es detalla la funció objectiu i després s'expliquen totes les constriccions per saber què fan exactament. Aquests passos es segueixen de la mateixa forma per als dos models per separat. Finalment es combinen els models i es detallen les modificacions.

El quart capítol explica els arxius AMPL[3] que s'utilitzen per al model d'optimització. També es mostren les solucions dels dos models amb els respectius comentaris. Finalment es fa una comparativa dels dos models per veure quin és més eficient.

Per últim, al cinquè capítol s'exposen les conclusions que s'extreuen globalment del projecte.

## 1.5 Conceptes bàsics sobre el funcionament del mercat elèctric

### 1.5.1 Mercat Diari

El Mercat Diari<sup>3</sup> té per objectiu portar a terme transaccions d'energia elèctrica per el dia següent mitjançant la presentació d'ofertes de venda i adquisició d'energia elèctrica per part dels agents del mercat: venedors i compradors.

Així doncs, els drets de cobrament de cada venedor es calculen com el producte de l'energia venuda pel preu marginal horari i, així mateix, les obligacions de pagament de cada comprador es calculen com el producte de les compres realitzades pel mateix preu marginal horari. Els drets de cobrament són iguals a les obligacions de pagament o, equivalentment, el mercat diari és un mercat equilibrat en energia: l'energia venuda és l'energia comprada.

Per una banda, es defineixen com a venedors totes les unitats de producció disponibles que no estiguin afectades d'algun contracte bilateral físic<sup>4</sup>, donat que tenen la obligació de presentar ofertes en el mercat diari, entenent com a tals cada unitat de cada grup tèrmic, cada central de bombeig pur, cada unitat de gestió de centrals hidràuliques i cada unitat de gestió de qualsevol conjunt de aerogeneradors que conflueixin a un mateix nus de la xarxa.

Per altra banda, els compradors del mercat de producció d'energia elèctrica són les distribuïdores, les comercialitzadores, els consumidors qualificats i els agents externs, la participació dels quals ha estat autoritzada en el Mercat Ibèric amb diversos fins:

- Distribuïdores: subministraran l'electricitat que precisin als consumidors amb tarifa regulada.
- Comercialitzadores: vendran l'energia a consumidors qualificats.
- Consumidors qualificats.
- Agents externs.

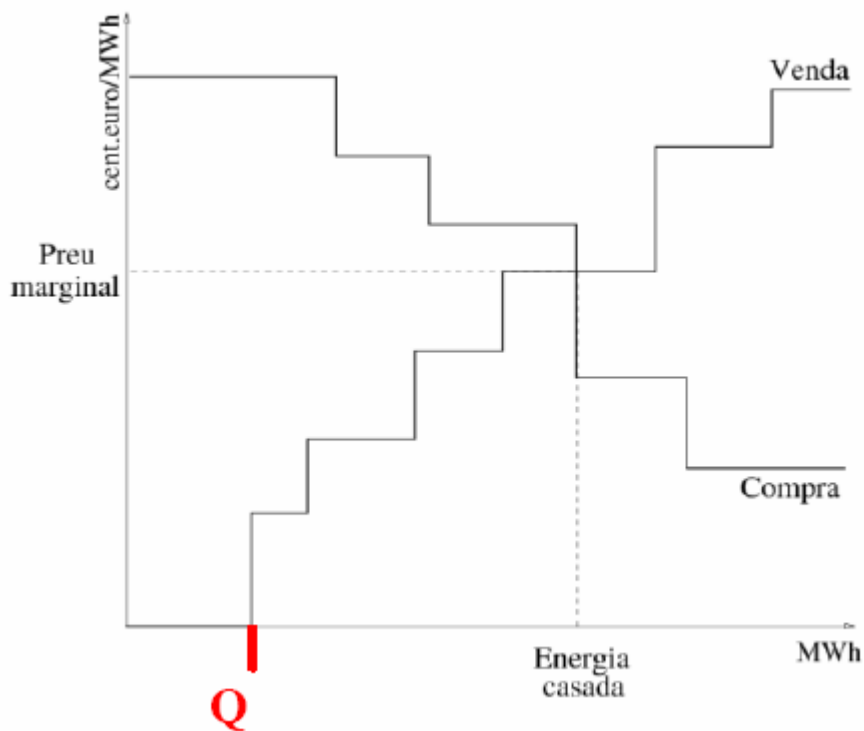
---

<sup>3</sup> Informació extreta del PFC d'Elisenda Vila Jofré[6].

<sup>4</sup> Contracte que genera obligacions recíproques per a les dues parts contractants.

El funcionament del mercat es basa en la presentació d'ofertes per part dels venedors a l'operador del mercat, el qual les inclourà al procediment de cassació (corresponent al dia successiu al de tancament de la recepció d'ofertes per a la sessió) compost per vint-i-quatre períodes horaris de programació consecutius.

Així mateix, les ofertes econòmiques d'energia elèctrica que es poden presentar a l'operador del mercat poden ser simples o incorporar condicions complexes en funció del seu contingut. Les ofertes simples consten de parells energia-preu per cada període horari, podent definir fins a 10 trams en cada hora de forma creixent.



**Oferta a preu instrumental**

Fig. 1.1: Cassació en el Mercat Diari.

L'operador del mercat realitza la cassació a les 10.00 hores amb totes aquelles ofertes rebudes anteriorment a la hora citada. El valor Q que es pot observar a la gràfica correspon a la quantitat total d'energia que els venedors oferten a

preu zero. Les raons per les quals s'oferta de franc aquesta energia s'explicarà al següent apartat (1.5.2).

En la cassació simple s'obté el preu marginal i el volum d'energia elèctrica acceptada per cada unitat de producció en cada tram horari independentment.

El preu en cada període horari serà el preu de l'últim tram de l'oferta de venda de l'última unitat de producció, la cassació de la qual hagi estat necessària per tal d'atendre la demanda.

El resultat de la cassació consisteix en la programació d'entrada a la xarxa establerta per l'operador del mercat a partir de la cassació de les ofertes de venda i adquisició d'energia elèctrica en el qual es determina, per a cada període horari d'un mateix horitzó diari, el volum d'energia elèctric que es requereix que es produeixi per tal de poder cobrir la demanda d'aquesta.

### 1.5.2 Mercat de futurs

Avui en dia, els contractes futurs<sup>5</sup> es tracten amb organitzacions derivades del mercat en la majoria dels mercats de l'electricitat. GenCos i altres participants envien les ofertes dels contractes de futur a l'operador del mercat, qui realment fa el procés de selecció.

Les característiques principals dels contractes de futurs són:

- **Acord físic o financer:** Els contractes de futurs físics realitzen l'acord en efectiu i l'entrega és física mentre que amb els financers l'acord només és amb efectiu.
- **Període d'entrega:** El període d'entrega defineix la duració del contracte. Als productes més comuns, el període d'entrega és d'un any, un quadrimestre, un mes, una setmana o un dia.

---

<sup>5</sup> La informació relacionada amb els mercats de futurs l'hem extret de l'article de Corchero-Heredia[2] que explicarem detalladament al capítol 3.1.

- **Càrrega:** Els contractes de futurs podrien ser de càrrega base o també de càrrega màxima. En els contractes de futurs de càrrega base la quantitat a obtenir és constant per a tots els intervals dels períodes d'entrega. En els contractes de futurs de càrrega màxima s'obté la quantitat només en intervals màxims (de les 8:00h a 24:00 p.m., del dilluns al divendres).

Suposem que una companyia generadora (GenCo) té un conjunt de contractes de futurs indicat per  $F$  per a un dia  $d$  com a resultat del procés del Mercat de Derivats. Aquest contracte ve definit per un preu i una quantitat d'energia,  $(\lambda_j^f, L_j), j \in F$ . Els contractes de futurs s'estableixen per diferències, és a dir, el preu unitari final que haurà de cobrar o pagar la GenCo ve donat per la diferència entre el preu del contracte ( $\lambda_j^f$ ) i el preu de cassació del mercat diari ( $\lambda_i^d$ ). Així, si la GenCo ha fet una oferta de venda a preu zero per la quantitat del contracte, en total al final cobrarà exactament el preu del contracte.

La funció d'ingressos del Mercat de Derivats a l'integral i és:

$$I_i^f = \sum_{\forall j \in F} (\lambda_j^f - \lambda_i^d) L_j$$

on  $\lambda_i^d$  és el preu del Mercat Diari.

## 2 EXTRACCIÓ I ANÀLISI DE LES DADES

L'objectiu d'aquesta secció és a partir d'una anàlisi descriptiva prèvia, entendre el comportament de la corba d'oferta de cada unitat tèrmica, per a posteriorment estimar els costos de generació de l'energia de cada unitat a partir de les dades d'aquestes. L'estimació dels costos són necessaris per a la modelització que veurem al capítol 3.

Per tal d'arribar al nostre objectiu, en primer lloc, hem d'extreure les dades, després les representarem gràficament i finalment farem l'estimació adient. En els següents capítols veurem tot el procés de forma detallada.

### 2.1 Introducció

Aquesta part descriu els passos que cal seguir per baixar els fitxers d'extensió .zip de les webs: [www.omel.es](http://www.omel.es) i [www.esios.ree.es](http://www.esios.ree.es) i crear diferents taules i consultes amb Access. Després guardem aquestes consultes amb el format txt i utilitzant Perl convertim aquests fitxers al format que necessitem per poder utilitzar Matlab. Un cop realitzar aquest procés, generem la gràfica de la corba d'oferta amb Matlab. Els programes utilitzats són:

- Script bash
- Perl
- WinScp (o equivalent)
- Microsoft Office Access 2003
- Microsoft Office Excel 2003
- Visual Basic (macros)
- Matlab

En aquest treball només s'han tingut en compte les unitats tèrmiques d'Unión Fenosa, encara que també hem fet l'anàlisi descriptiva de les unitats de cicle combinat d'aquesta companyia elèctrica, però aquestes últimes no les hem utilitzat més. I només hem tingut hem tractat amb les dades del maig. Les unitats tèrmiques d'Unión Fenosa són:

- Central tèrmica Anllares grup 1 (ALL1)
- Central tèrmica La Robla grup 1 (ROB1)

- Central tèrmica La Robla grup 2 (ROB2)
- Central tèrmica Nárcea grup 1 (NRC1)
- Central tèrmica Nárcea grup 2 (NRC2)
- Central tèrmica Nárcea grup 3 (NRC3)
- Central tèrmica Sabón grup 1 (SBO1)
- Central tèrmica Sabón grup 2 (SBO2)

Després d'obtenir la gràfica de la corba d'oferta de les unitats tèrmiques mostrem l'anàlisi descriptiva de dues d'aquestes per tal de fer-nos una idea de com es comporten. Finalment, calculem uns coeficients que seran els costos de generació del nostre model.

## 2.2 Extracció de dades

Aquesta secció conté una descripció detallada de com descarregar els fitxers de dades i convertir-los a format Matlab. Les passes d'aquest procés són les següents:

- Baixar els fitxers i deszipar-los
- Eliminar les dues primeres línies
- Crear una taula amb Access per cada fitxer
- Crear consultes amb Access i conversió de les consultes a fitxers 'txt'
- Conversió dels fitxers \*.txt a \*.m
- Generació dels fitxers referents als contractes bilaterals
- Dades extretes del full de càlcul I90DIA26
- Dades extretes del full de càlcul I90DIA27

### 2.2.1 Descàrrega dels fitxers

Tenim un fitxer anomenat *download\_curva\_pbc\_uof.sh* que conté un script per baixar la llista de fitxers de la web: [www.omel.es](http://www.omel.es) i deszipar-los. Aquest procés l'hem fet també per a baixar-nos la llista de fitxers dels contractes



bilaterals, canviant la web de l'script que havíem utilitzat per aquesta: [www.esios.ree.es](http://www.esios.ree.es) . Ens hem descarregat les dades per al mes de maig del 2008.

Un cop descarregats aquests fitxers, necessitem una rutina que s'ocupi d'extreure els fitxers, ja que estan en format \*.zip. Això ho farem amb un script perl anomenat *unzip.pl* (\*).

Un cop descarregats i deszipats a aquests arxius tenim la següent informació: Hora

- Data
- País
- Unitat
- Tipus Oferta: C si és compra o V si és de venda.
- Energia compra/venda en MWh
- Preu compra/venda en €
- Ofertada o Cassada. O si és ofertada i C sí és cassada

## 2.2.2 Formatat dels fitxers de dades

Els fitxers d'extensió ".1" baixats tenen la següent estructura:

```
línia de títol
línia en blanc
camps separats per ;
diferents línies amb els valors dels camps
```

El següent pas és convertir aquest fitxer en una taula Access, però ens trobem amb un problema. Per poder crear una taula amb aquest fitxer hem d'eliminar les dues primeres línies: línia de títol i línia en blanc.

A més, Access necessita que els fitxers que volem convertir en una taula tinguin una extensió 'txt'. Hem creat l'script Perl *del2linies.pl* que elimina les dues primeres línies de tots els fitxers del directori actual acabats per '.1', els

grava amb el mateix nom afegint una “m\_” al davant de tot i canvia l’extensió 1 per l’extensió text. Així que executem l’script Perl i ja ho tenim.

Trigarà uns 10 minuts en baixar-se els fitxers \*.zip, deszipar-los per obtenir els fitxers d’extensió ‘.1’ i crear els nous fitxers d’extensió ‘txt’ tot eliminant les dues primeres línies.

Un cop tinguem els fitxers, els hem de copiar a Windows, utilitzant per exemple, el WinSCP o un altre programa de gestió de fitxers. Aquesta operació triga 2 minuts depenent de la connexió, ja que cada fitxer ocupa aproximadament 1 MB.

### **2.2.3 Crear una taula amb Access**

Creem un projecte d’Access buit i importem les següents macros d’Access:

- *ModulFitxer2Taula*
- *ModulConsulta2Txt*
- *ModulTaula2ConsultaOCP*
- *EliminarTaules*
- *EliminarObjectes*
- *ModulTot*

Editem la macro de nom *ModulFitxer2Taula* canviant el nom del fitxer base i el nom dels directoris.

Aquesta macro consta de dos bucles, un per cada dia i un per cada mes. Per cada iteració es crea una taula amb el nom del fitxer corresponent. Tenim una taula amb el nombre de dies de cada mes, però en el cas que el nom del fitxer no existeixi, doncs no fa res.

Per executar la macro ens convé tenir la màxima memòria de Windows lliure i esperar aproximadament uns 10 minuts. Per fitxers massa grans, convindrà fer més d’un projecte.

#### **2.2.4 Crear consultes amb Access i conversió de fitxers a \*.txt**

Per fer aquests passos usem la macro d'Access *ModulTot* que crida a les macros *ModulTaula2ConsultaOCP* (unitat,num) i *ModulConsulta2Txt* (unitat,num) amb el nom de la unitat que volem estudiar i el valor del paràmetre num que desitgem.

El paràmetre num pot pendre els dos valors següents:

- num=2, per l'energia ofertada 'O'.
- num=3, per l'energia cassada 'C'.

La macro *ModulTaula2ConsultaOCP* ens fa la consulta que li demanem i la macro *ModulConsulta2Txt* ens passa els fitxers a 'txt'. Es recomana no fer consultes excessivament grans ja que el programa podria trigar hores en executar-se.

#### **2.2.5 Conversió dels fitxers \*.txt a format Matlab \*.m**

Aquest pas és molt senzill. Usem l'script Perl *txt2Matlab.pl* (\*) que converteix els fitxers d'extensió 'txt' en extensió 'm'. Cal cridar aquest script des de cadascun dels directoris.

#### **2.2.6 Generació dels fitxers referents als contractes bilaterals**

Per descarregar aquests fitxers utilitzem l'script *downloadcurva.sh*, llavors obtenim els \*.zip de la web: [www.esios.ree/Descargar/I90DIA\\_2008MMDD.zip](http://www.esios.ree/Descargar/I90DIA_2008MMDD.zip) on DD és el dia i MM és el mes. Es dezenzipen tots utilitzant el mateix script. Aquesta operació l'hem de fer dos cops: una per al full de càlcul I90DIA26 i l'altre per al I90DIA27.

### **2.2.7 Dades extretes del full de càlcul I90DIA26**

Anem a Windows i obrim els fitxers I90DIA\_2008MMDD.xls amb l'Excel i per cada fitxer guardem el full de càlcul I90DIA26, que conté les dades referents als contractes bilaterals. Per fer això, primer usem la macro d'Excel *Eliminar3Files*. Aquesta elimina les tres primeres files de títols que no usarem.

Després usarem la macro d'Excel *OmplirZeros* per omplir amb 0,0 les cel·les buides del full de càlcul I90DIA26. Convé omplir amb zeros les cel·les buides perquè després convertirem aquest fitxer per ser llegit per Matlab i caldrà que totes les files tinguin la mateixa llargada.

Finalment usem la macro *ExportarFullDIA26* per extreure el full de càlcul I90DIA26 dels fitxers anteriors en format 'txt' amb els camps separats per tabuladors.

Per cridar a les tres macros podem usar la macro *Executar3macros*.

Aquests últims fitxers d'extensió '.xls.txt' els transformem a extensió '.m' utilitzant l'script Perl *txt2MatlabCB26.pl*. Aquest script serà una mica diferents als que hem utilitzat anteriorment ja que tindrà en compte els tabuladors i les dades que provenen d'Excel enlloc d'Access.

### **2.2.8 Dades extretes del full de càlcul I90DIA27**

En aquest pas es tracta de realitzar les mateixes operacions a partir de les dades del full de càlcul I90DIA27. Les macros són les mateixes substituint el 26 pel 27.

## 2.3. Generació de gràfiques amb Matlab

En aquest capítol veurem com arribar a representar les nostres dades amb l'ajuda de Matlab. Utilitzarem dos programes, *graficMes* o *graficHores* dependent dels intervals de temps i les gràfiques que volem representar. En els dos casos obtindrem dues gràfiques: la gràfica de la corba d'oferta i la de la seva respectiva pendent. Més endavant explicarem com executar aquests programes.

### 2.3.1 Gràfica de la corba d'oferta

Les rutines que hem esmentat anteriorment dibuixen la corba d'oferta de l'unitat triada per a l'interval de temps escollit. L'eix de les x representa l'energia (MWh) i l'eix de les y l'energia ofertada (€/kWh). Per representar la corba usarem les dades que tenim de l'energia ofertada.

En la mateixa gràfica també dibuixem un punt vermell. Aquest representa l'energia cassada en aquell interval. Per representar l'energia cassada usarem les dades que tenim respecte a aquesta.

Finalment, a la mateixa gràfica també tenim tres rectes verticals de colors taronja, verd fosforescent i marró clar que representen:

- Potència bruta de color taronja.
- Potència neta (segons la web del ministeri) de color verd fosforescent (no sempre tenim aquesta dada).
- Potència neta segons la web REE de color marró clar.

#### 2.3.1.1 Paràmetres

A continuació explicarem com cridar les rutines que hem esmentat anteriorment.

En primer lloc per tenir la llista de totes les unitats d'Unión Fenosa i de Gas Natural cridem l'acció *listarUnitats*. Només hem d'escriure a la pantalla de Matlab: `listar_unitats`. Llavors ens mostrarà dues llistes: una per a les unitats d'Unión Fenosa i una altra per a les unitats de Gas Natural, encara que com hem dit abans, nosaltres només hem estudiat les de Unión Fenosa.

Per cridar al programa *GraficMes* hem d'escriure la següent línia:

```
graficMes(any, mes, hora, boolea, nom_unitat, nom_companyia).
```

L'hora pot ser un valor entre 1 i 24h per dibuixar les gràfiques referents a una hora en concret o bé 0 per dibuixar les gràfiques a totes les hores. El booleà l'explicarem més endavant, però els valors que pot prendre són: true o false. I els altres paràmetres no tenen cap complicació. Recordem que podem utilitzar la rutina *listarUnitats* per recordar el nom de la unitat que volem que utilitzi.

Aquesta acció (*graficMes*) ens mostra el comportament de la corba d'oferta amb la seva respectiva pendent de tots els dies que vulguem per a una hora en concret o, si volem per a totes les hores, com hem dit abans, posem un 0 al paràmetre hora.

Per cridar el programa *GraficHores* escriurem la següent línia:

```
graficHores(any, mes, hora, boolea, nom_unitat, nom_companyia)
```

Com podem observar els paràmetres són els mateixos. En aquest cas s'obren dues finestres, en una estan les corbes d'oferta de totes les hores per a un dia en concret i a l'altra trobem les respectives pendents. Podem demanar-li més d'un dia, llavors se'ns obriran més finestres amb la mateixa informació per a tots els dies. També recordem que podem demanar-li per a totes les hores si posem un 0 al paràmetre hora. Diguem que amb aquesta acció podem veure el comportament de forma més detallada ja que podem demanar-li la corba d'oferta i la pendent per a un dia i hora en concret i ens surten dos gràfics grans on es veu clarament el seu comportament.

En canvi, l'acció `graficMes` ens serveix per veure el comportament de la corba d'oferta de forma més general. Aquesta la utilitzarem per veure els diferents patrons que hi han durant el mes de maig.

### **2.3.1.2 Contractes Bilaterals**

Si ens fixem, al principi de la gràfica de la corba d'oferta dibuixem una línia horitzontal grisa que ens indica els contractes bilaterals assignats per aquella unitat tèrmica en aquella data. Els MWh assignats en aquella unitat els obtenim dels fulls de càlcul I90DIA26 i I90DIA27. Si no veiem cap línia de color gris significa que la unitat no té cap contracte bilateral assignat.

### **2.3.2 Gràfica de les pendents.**

Aquesta gràfica ens representa el pendent de la corba d'oferta per cada interval.

Si la variable booleana és certa s'eliminen els dos últims intervals al dibuixar els pendents. Això ens interessa fer-ho així perquè el pendent dels dos últims intervals és molt gran. Si la variable booleana és falsa, llavors l'eix de les y és molt gran i perdem precisió en altres intervals.<sup>6</sup>

## **2.4. Anàlisi descriptiva de les dades**

Abans de res, com ja sabem, és convenient fer un anàlisi descriptiu de les dades que tenim per veure més o menys el comportament d'aquestes. Nosaltres, amb l'ajuda d'Access i Matlab hem pogut portar a terme aquest treball.

En primer lloc vam utilitzar Access. Vam importar unes macros a aquest programa i amb l'ajuda d'aquestes vam obtenir les taules i consultes que

---

<sup>6</sup> Nota: Totes les macros mencionades durant aquest capítol es poden trobar als annexos corresponents a aquesta secció.

necessitàvem. Un cop realitzat aquest treball, amb Matlab vam poder fer la representació gràfica de cada unitat tèrmica al dia i l'hora que volíem per poder determinar el comportament que hi tenien aquestes.

A continuació explicarem detalladament dues unitats tèrmiques ja que serà suficient per fer-nos una idea del comportament d'aquestes.

#### 2.4.1 Unitat tèrmica ALL1:

Primer mostrem la llegenda per saber que representen els colors dels gràfics que anirem veient en aquest apartat:



Fig. 2.1: Llegenda corresponent a les gràfiques de les corbes d'oferta

Oferta de tres maneres diferents al llarg del mes de maig del 2008:

- Del 1 al 9 de maig.
- Del 10 al 24 de maig.
- Del 25 al 31 de maig.



## Comportament de l'oferta del dia 1 al 9 de maig:

El següent gràfic mostra el comportament de la corba d'oferta d'aquest període temps durant les 24 hores del dia. Hem escollit un dia a l'atzar entre el dia 1 i 9 de maig ja que vam observar el mateix comportament durant tot el període.

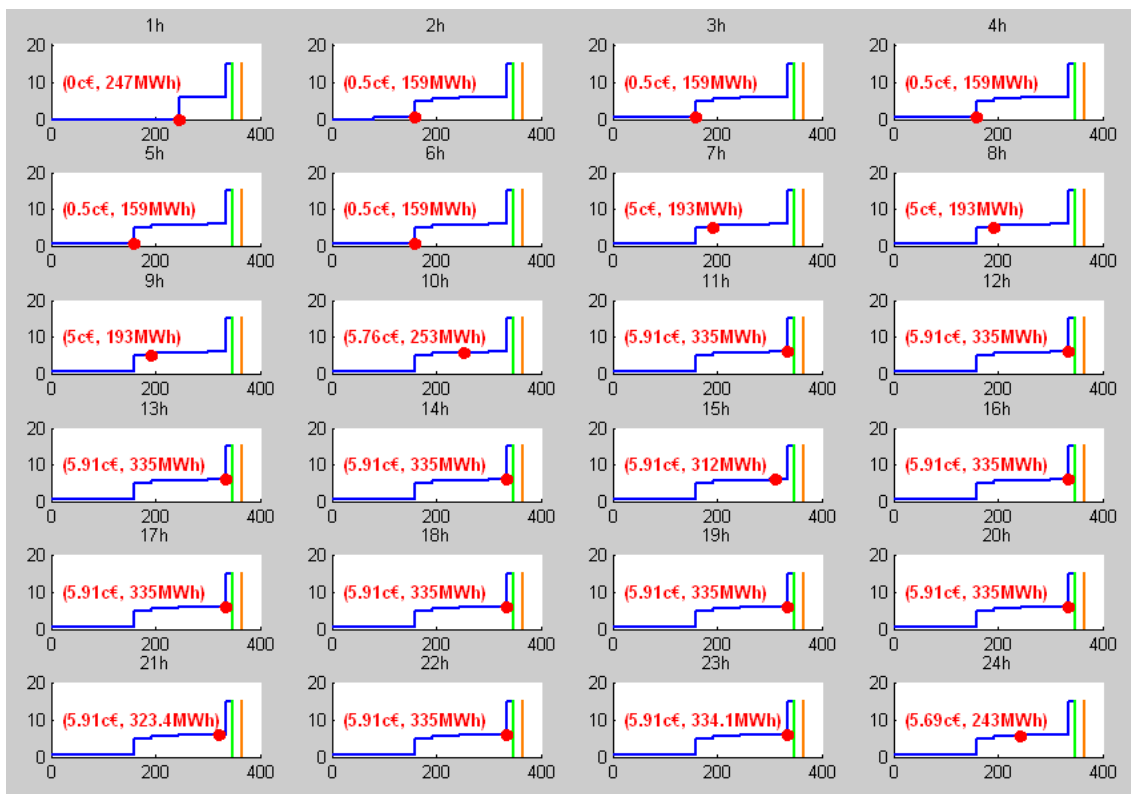


Fig. 2.2: Corbes d'oferta de la unitat ALL1 durant el dia 8 de maig del 2008

Fins les 6:00h de la matinada es casa a 0,5 cèntims i després a 5,91 cèntims aproximadament. Si recordem, abans hem parlat dels contractes bilaterals però per aquest dia no n'hi han.

A continuació mirarem el gràfic de pendents que hi tenim a continuació:

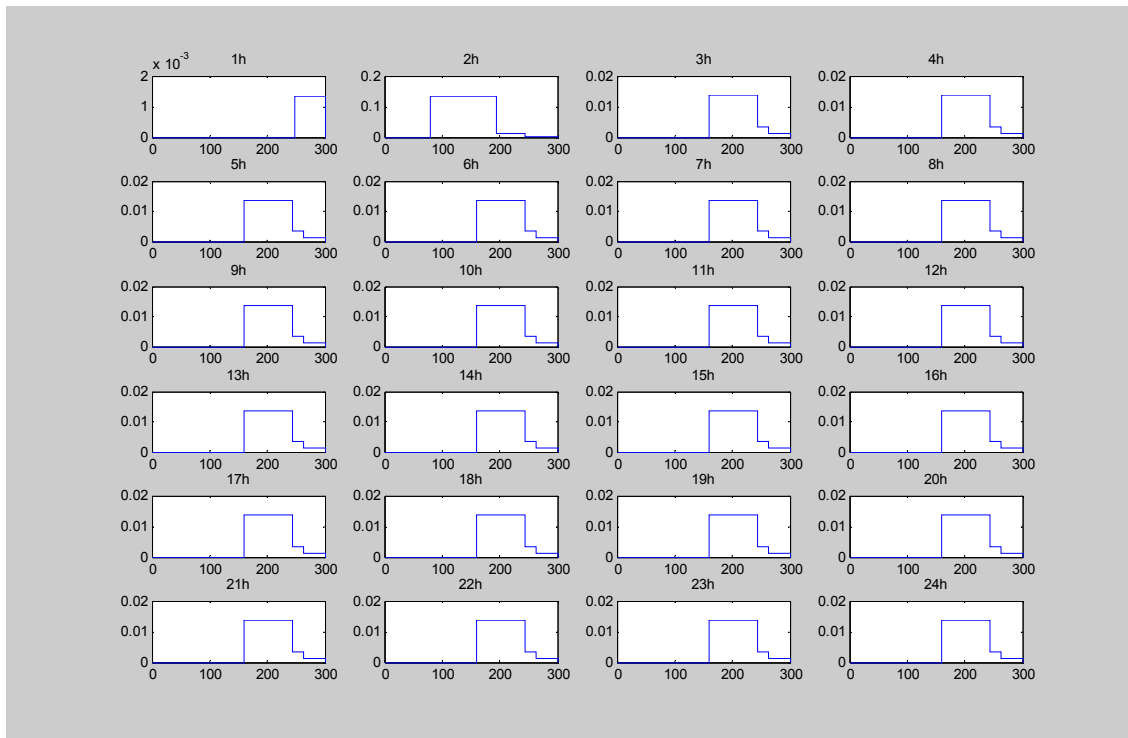


Fig. 2.3: Gràfic de pendents de la unitat ALL1 durant el dia 8 de maig de 2008

En aquestes gràfiques és on realment veiem que en aquest període de temps l'oferta segueix el mateix patró. Les pendents es troben en valors entre 0 i 0,014 aproximadament.

La pendent comença valent zero al primer tram d'oferta. Al següent tram, la pendent augmenta i arriba a prendre un valor al voltant de 0,014. De fet, això ens indica que després del tram de pendent zero, sembla que l'oferta té un comportament lineal amb una pendent propera a 0,014.

A continuació mostrem un gràfic de la corba d'oferta i un de la seva pendent per a una hora en concret. D'aquesta forma veurem d'una forma més clara i contundent el que hem vist anteriorment.

Gràfic de la corba d'oferta:

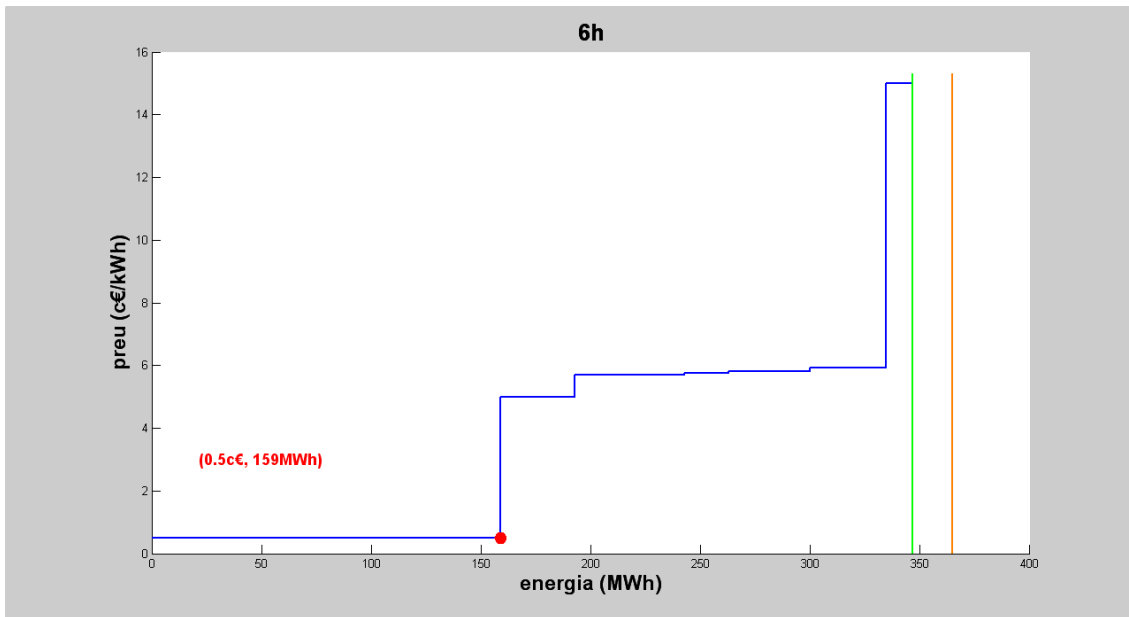


Fig. 2.4: Corba d'oferta de la unitat ALL1 el dia 8 de maig de 2008 a les 6 hores

Gràfic de pendents:

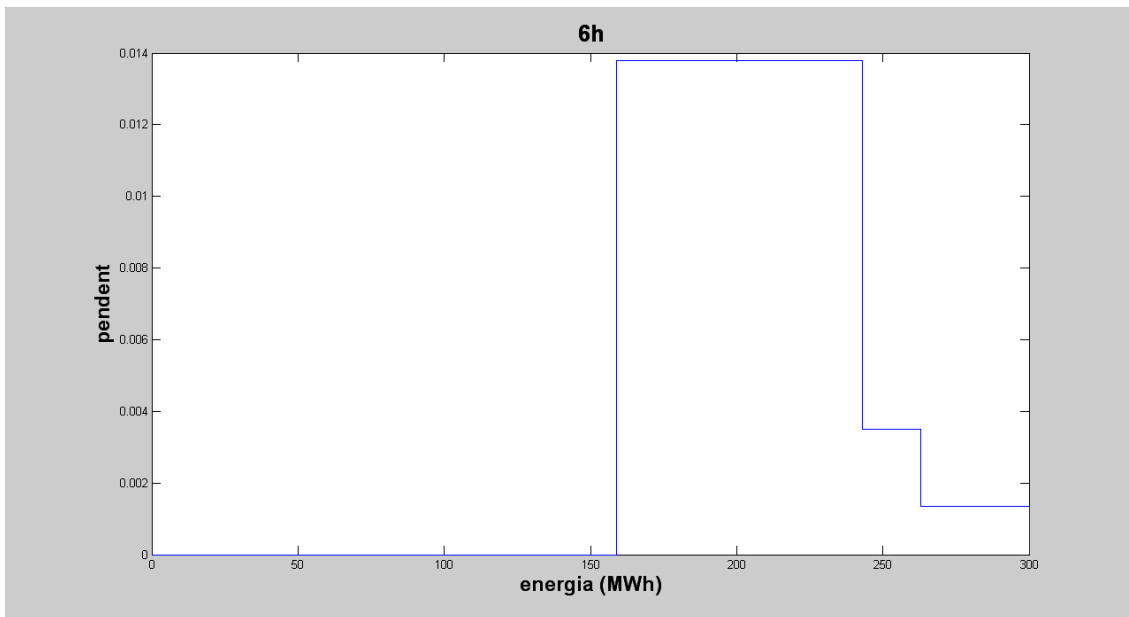


Fig. 2.5: Gràfic de pendent de la unitat ALL1 el dia 8 de maig de 2008 a les 6 hores

## Comportament de l'oferta del dia 10 al 24 de maig:

Com hem fet al període anterior, hem escollit un dia a l'atzar comprès entre el dia 10 i 24 de maig. A sota observem les corbes d'oferta d'aquest dia per a les 24 hores.

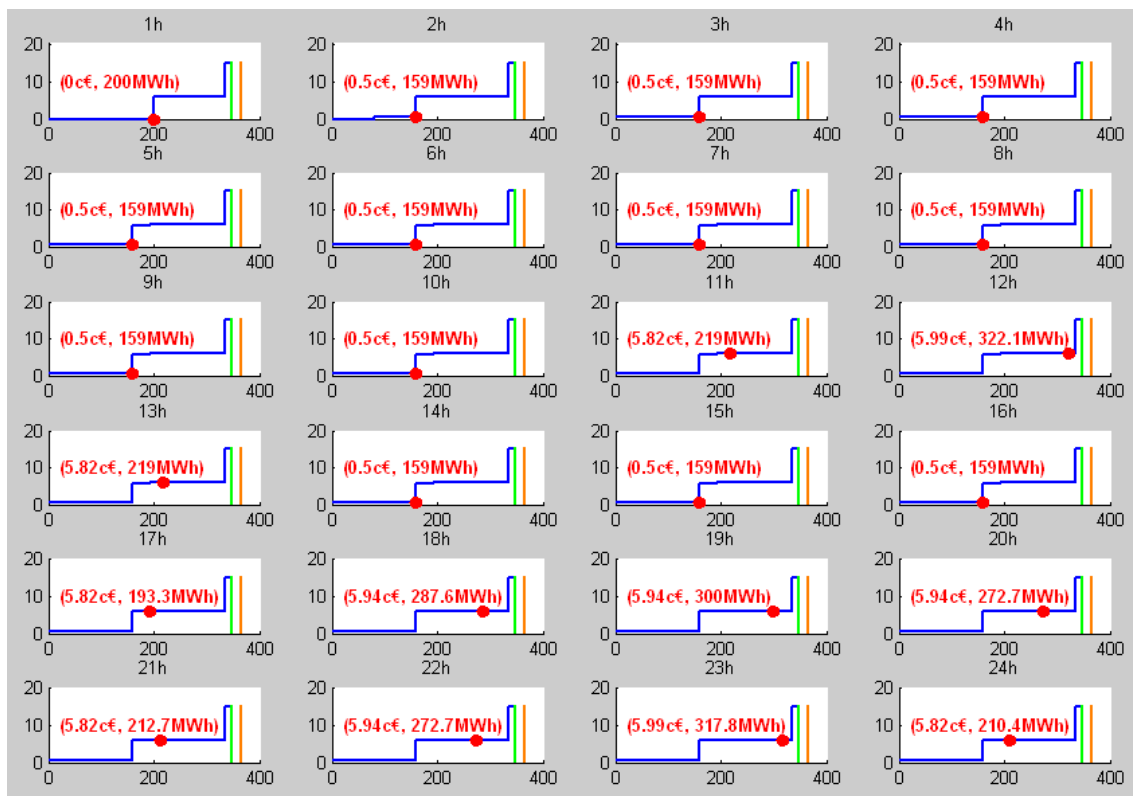


Fig 2.6: Corbes d'oferta de la unitat ALL1 el dia 15 de maig de 2008

Fins les 10:00h del matí l'energia es casa a 0,5 cèntims. A partir d'aquesta hora augmenta de forma notable al voltant de 6 cèntims encara que hi han algunes hores soltes on es segueix casant a 0,5 cèntims. No hi han contractes bilaterals assignats a aquesta unitat tèrmica per aquest dia en concret.

Seguidament mostrarem el gràfic de pendents per veure el comportament de la corba d'oferta.

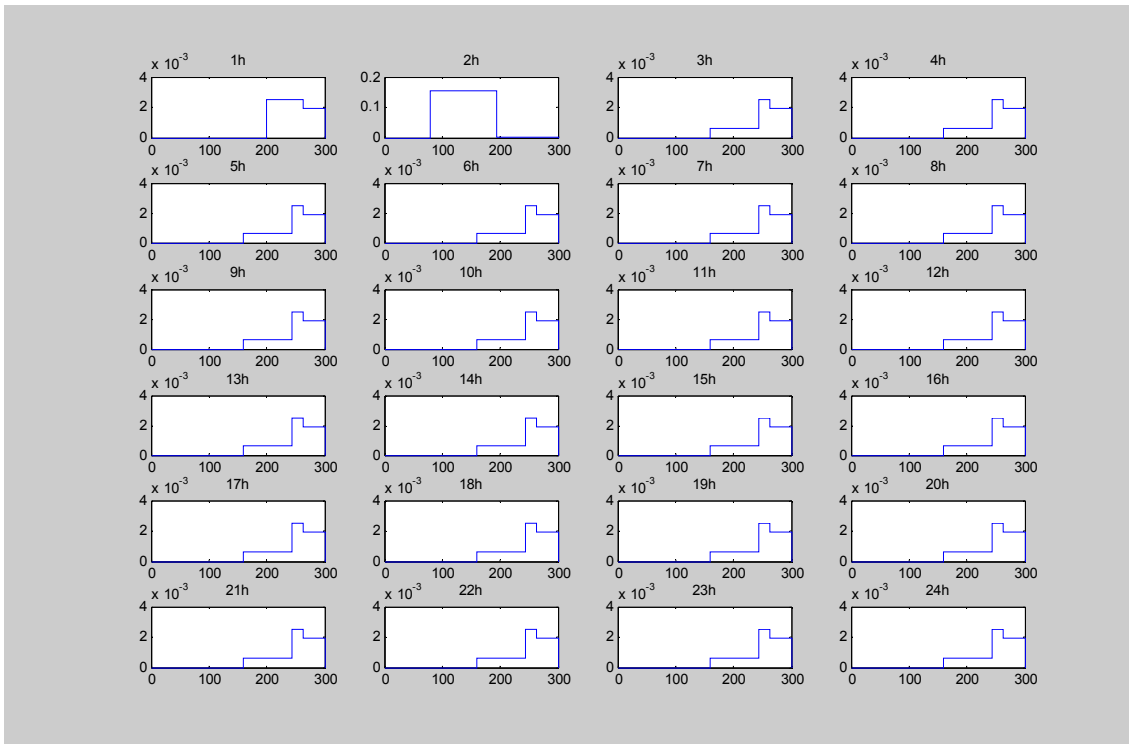


Fig. 2.7: Gràfic de pendents de la unitat ALL1 el dia 15 de maig de 2008

Veiem que les pendents mostren un comportament molt semblant entre hores. D'altra banda, veiem que podem comentar el mateix que en el període de temps comentat anteriorment, és a dir, comença amb un tram amb pendent igual a zero, per a continuació adoptar un valor de 0,0025 i posteriorment la pendent torna a mostrar-se constant amb valors molt pròxims a zero.

Com abans, veurem un gràfic de la corba d'oferta i un de la seva pendent per a una hora en concret.

Gràfic de la corba d'oferta:

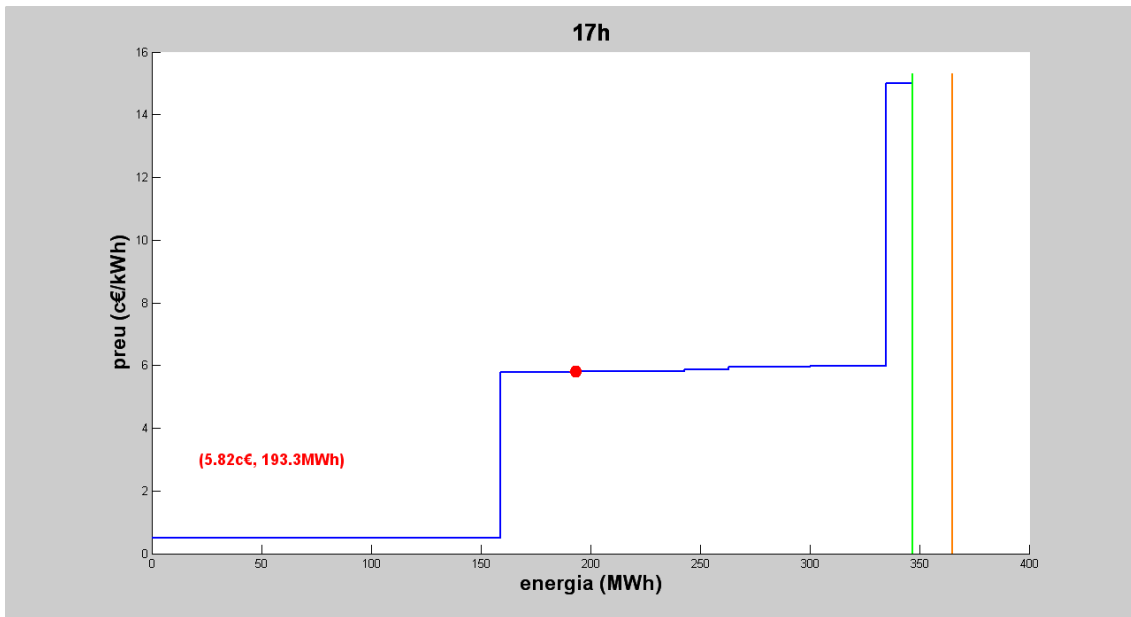


Fig. 2.8: Corba d'oferta de la unitat ALL1 el dia 15 de maig de 2008 a les 17 hores

Gràfica de pendents:

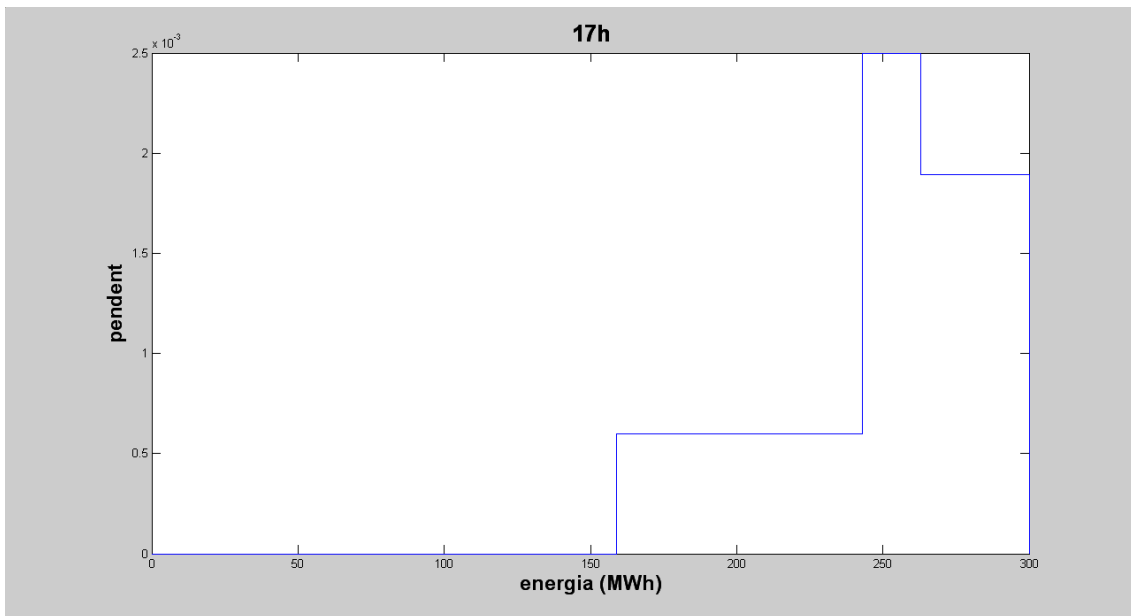


Fig. 2.9: Gràfica de pendents de la unitat ALL1 el dia 15 de maig de 2008 a les 17 hores

## Comportament de l'oferta del dia 25 al 31 de maig:

A sota tenim el gràfic amb les corbes d'oferta d'un dia en concret de les 24 hores del dia.

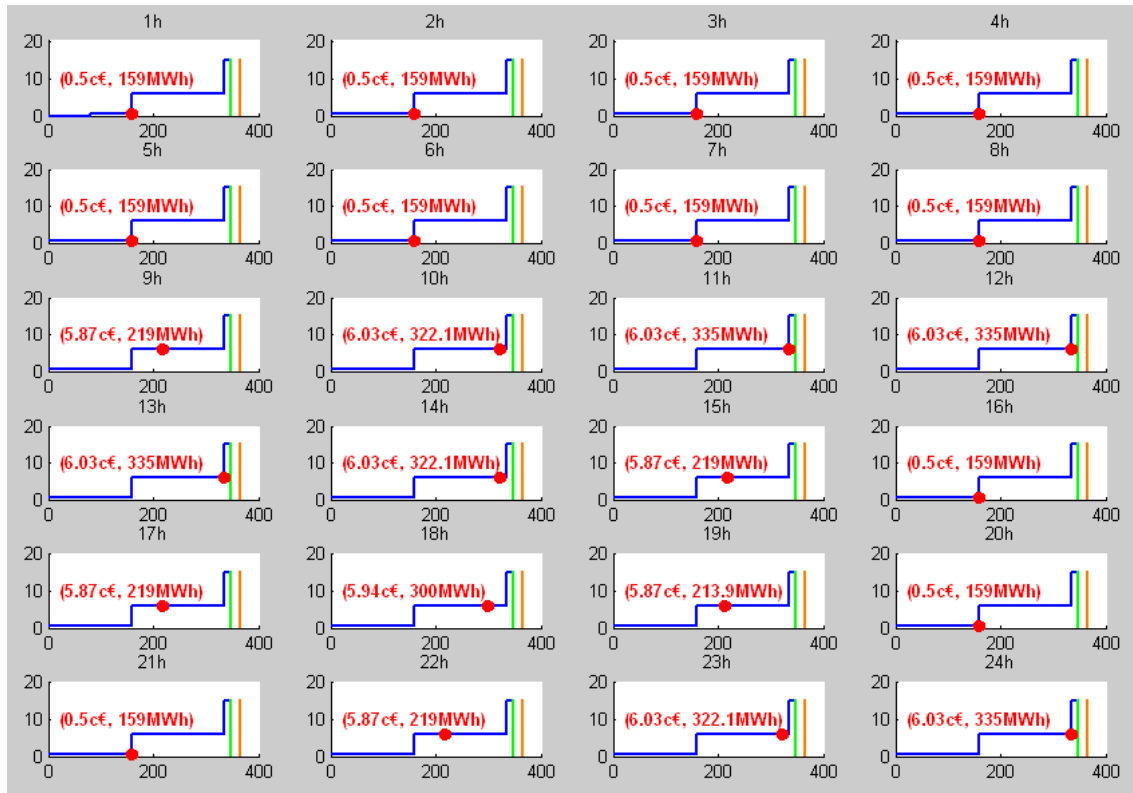


Fig 2.10: Corbes d'oferta corresponents al dia 26 de maig del 2008

En aquest cas fins les 8:00h del matí l'energia es casa a 0,5 cèntims i després fins les 24:00h al voltant dels 6 cèntims. Tampoc tenim contractes bilaterals.

Seguidament, les gràfiques de pendents corresponents a les corbes d'oferta que hem mostrat anteriorment són:

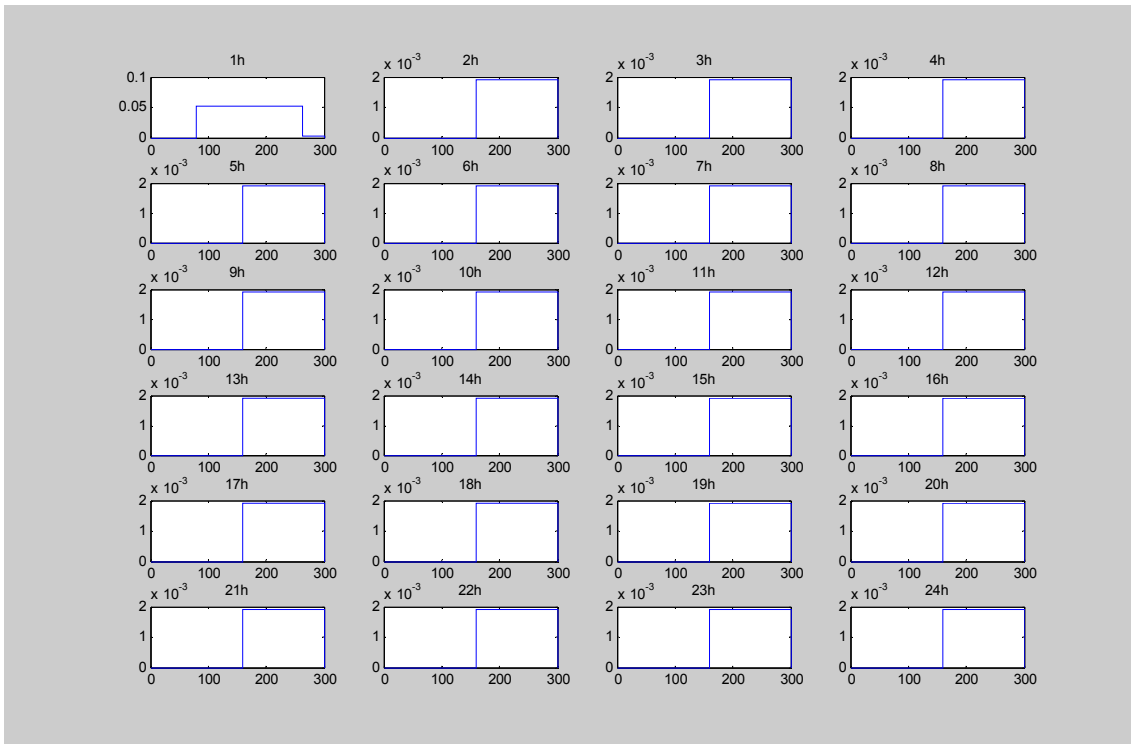


Fig. 2.11: Gràfics de pendents corresponents al dia 26 de maig del 2008

En aquest cas, veiem un comportament molt similar als anteriors períodes comentats. Al primer tram la pendent és 0 i després augmenta fins arribar aproximadament a un valor de 0,002. Aquest cas, és clarament l'exemple més clar del comportament que ens agradaria que tinguessin totes, és a dir, un primer tram de pendent zero, i posteriorment s'oferta de manera lineal.

Per últim, veurem un gràfic de la corba d'oferta i un altre de les pendents en el dia en el qual estem treballant i per a una hora en concret.



Gràfica de la corba d'oferta:

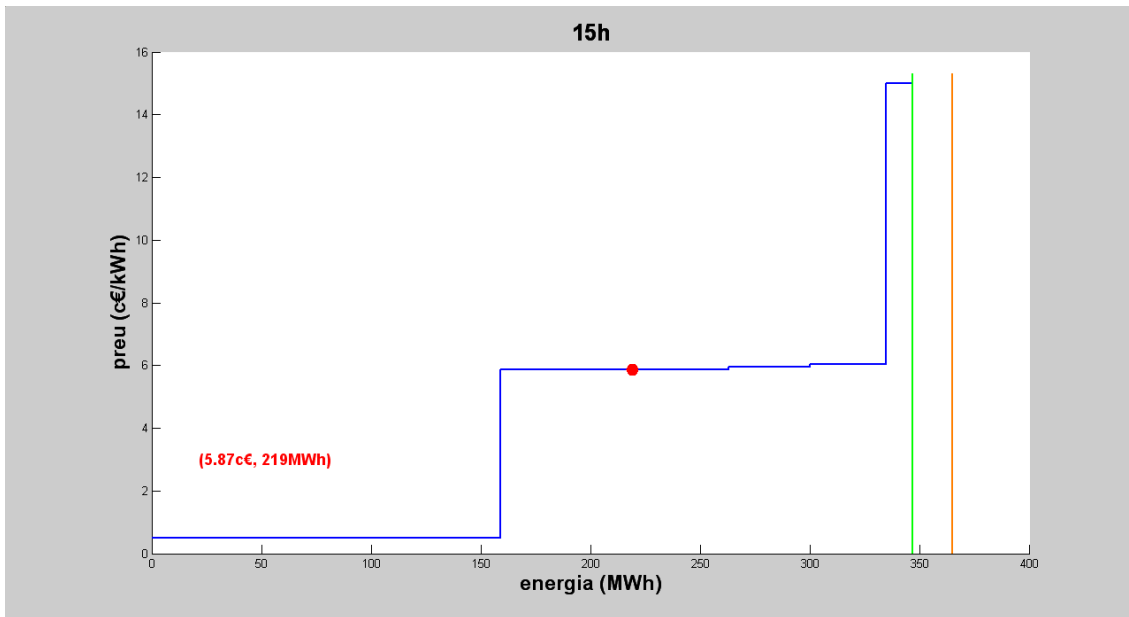


Fig 2.12: Corba d'oferta de la unitat ALL1 el dia 26 de maig de 2008 a les 15 hores

Gràfica de pendents:

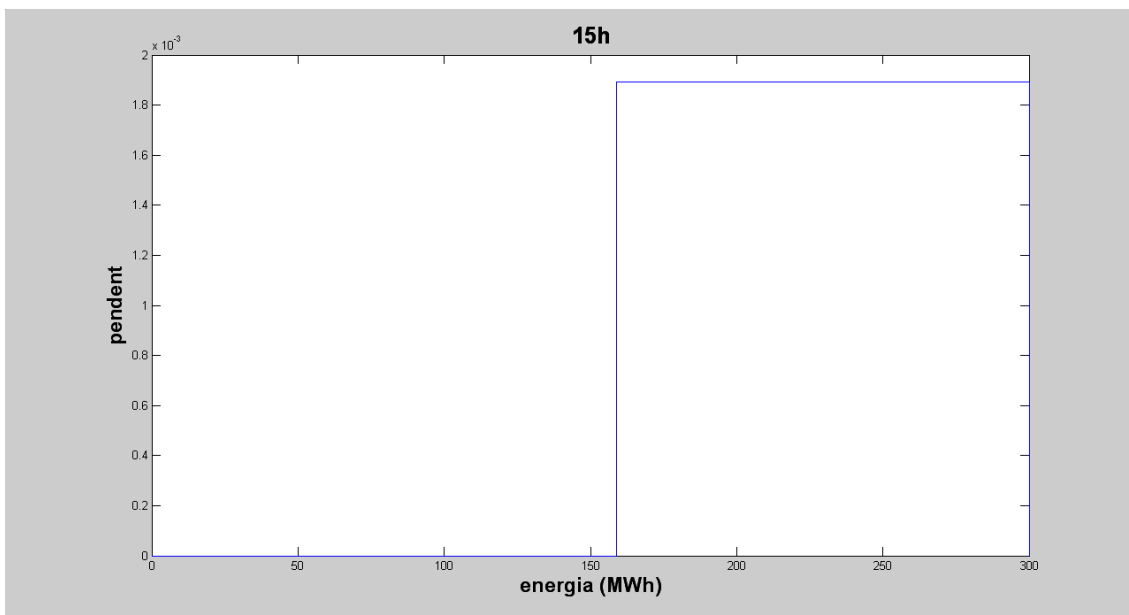


Fig. 2.13: Gràfica de pendents de la unitat ALL1 el dia 26 de maig de 2008 a les 15 hores

## 2.4.2 Unitat tèrmica ROB2:

La llegenda és la mateixa, no obstant, la recordem per tal de que ens sigui més fàcil la interpretació dels següents gràfics.



Fig 2.14: Llegenda corresponent a les gràfiques de les corbes d'oferta

Oferta de quatre maneres diferents al llarg del mes de maig del 2008:

- Del 1-10 i del 15-17 de maig.
- Del 11-14 i del 21-23 de maig.
- Del 18-20 i del 29-31 de maig.
- Del 24-28 de maig.

En aquesta unitat tèrmica, com veiem, els períodes en els quals l'hem dividit degut al seus comportaments són una mica més complexos, però seguirem el mateix esquema que a l'exemple anterior (ALL1).

## Comportament de l'oferta del dia 1-10 i del 15-17 de maig:

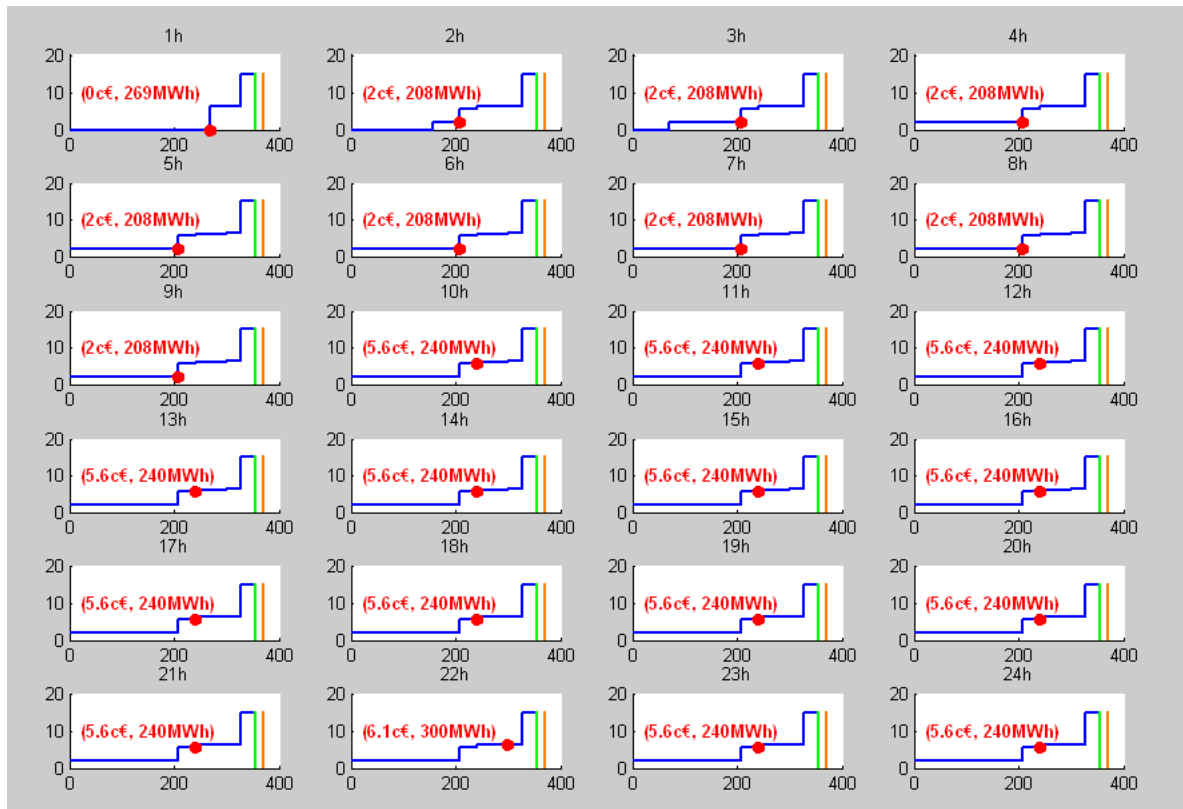
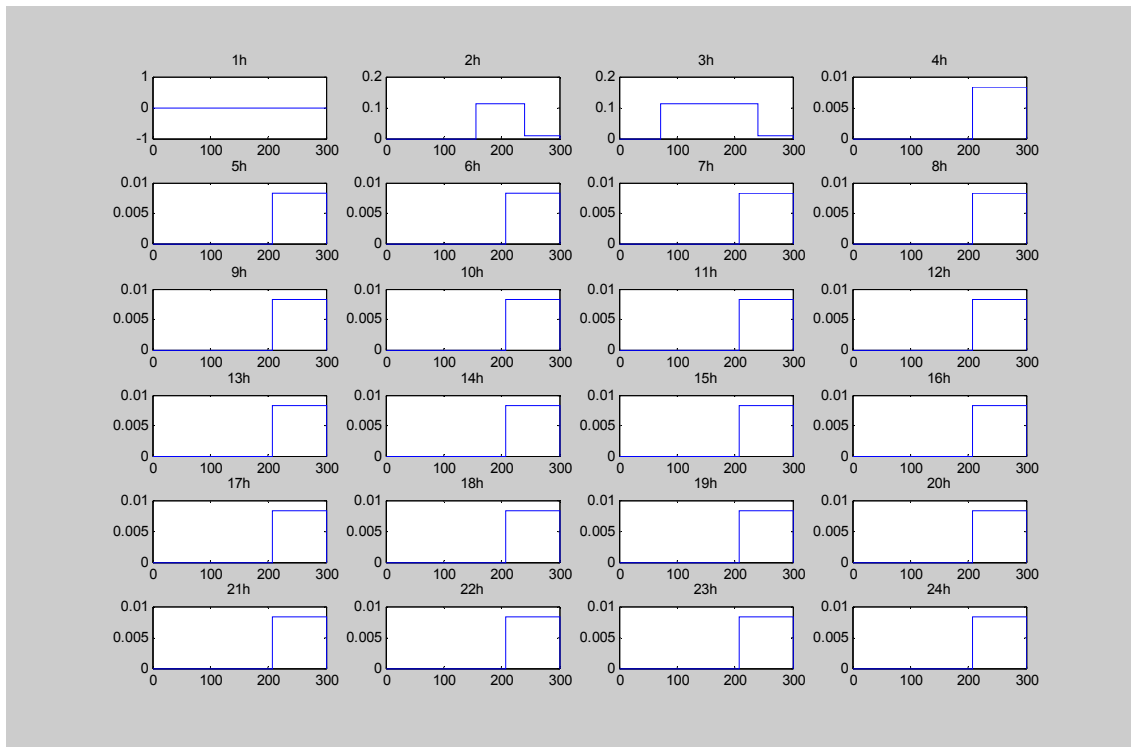


Fig 2.15: Gràfiques de les corbes d'oferta de la unitat ROB2 durant el dia 8 de maig de 2008

Fins a les 9:00h es casa a 2 cèntims, exceptuant a la 1:00h que es casa a 0 cèntims i després es casa a 5,6 cèntims a excepció de les 22:00h que es casa a 6,1 cèntims. Un altre cop no hi tenim contractes bilaterals.

Anem a veure el gràfic de pendents diari:

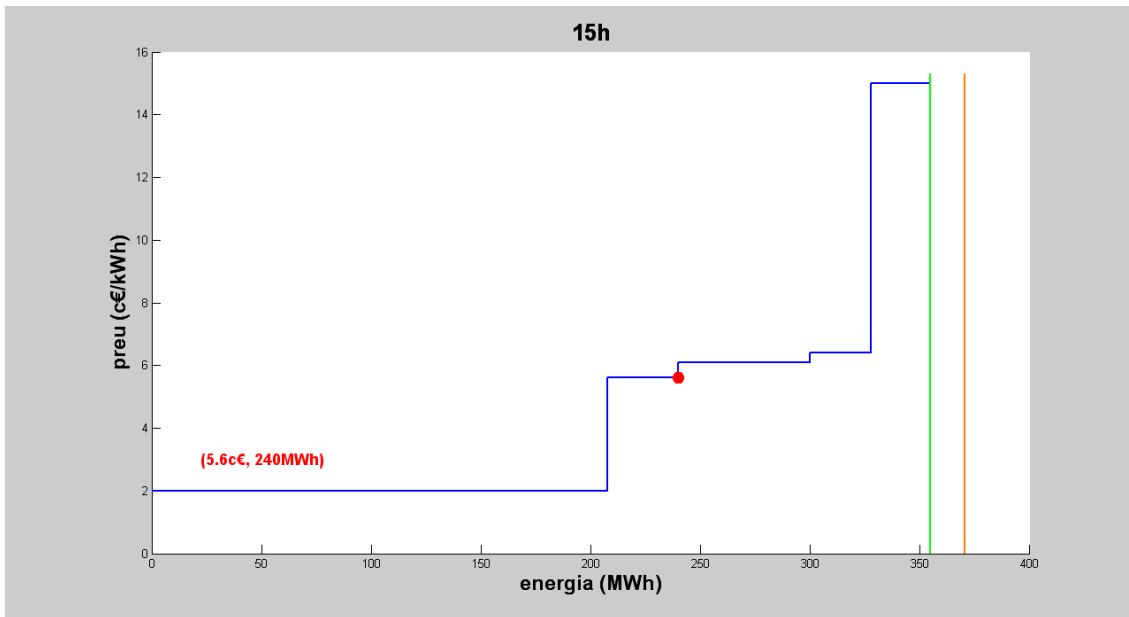


2.16: Gràfics de pendents de la unitat ROB2 durant el dia 8 de maig de 2008

Al gràfic veiem que a partir de les 4 hores els valors de les pendents es comporten de forma idèntica. De fet, el seu comportament és exactament igual al de l'anterior unitat tèrmica comentada (ALL1), ja que mostra un primer tram amb pendent igual a zero; a continuació un segon tram on la pendent augmenta, en aquest cas s'aproxima a 0,009 i a partir d'aquí torna a mantenir-se constant amb valors aproximadament zero.

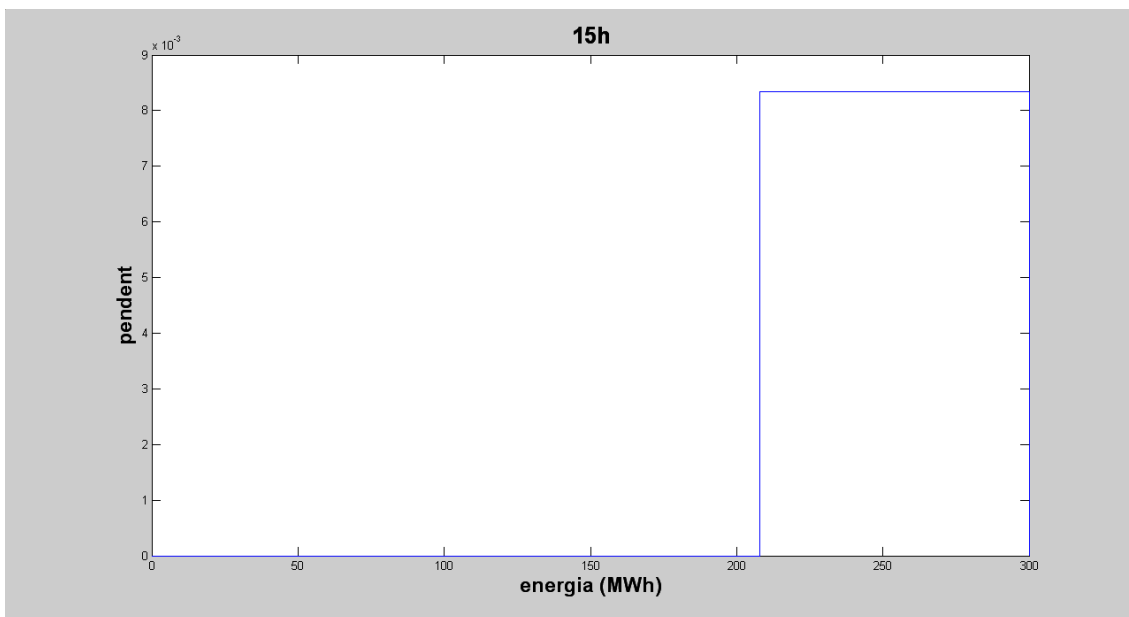
A continuació, veurem un gràfic de la corba d'oferta i un altre de les pendents en el dia en el qual estem treballant i per a una hora en concret.

Gràfica de la corba d'oferta:



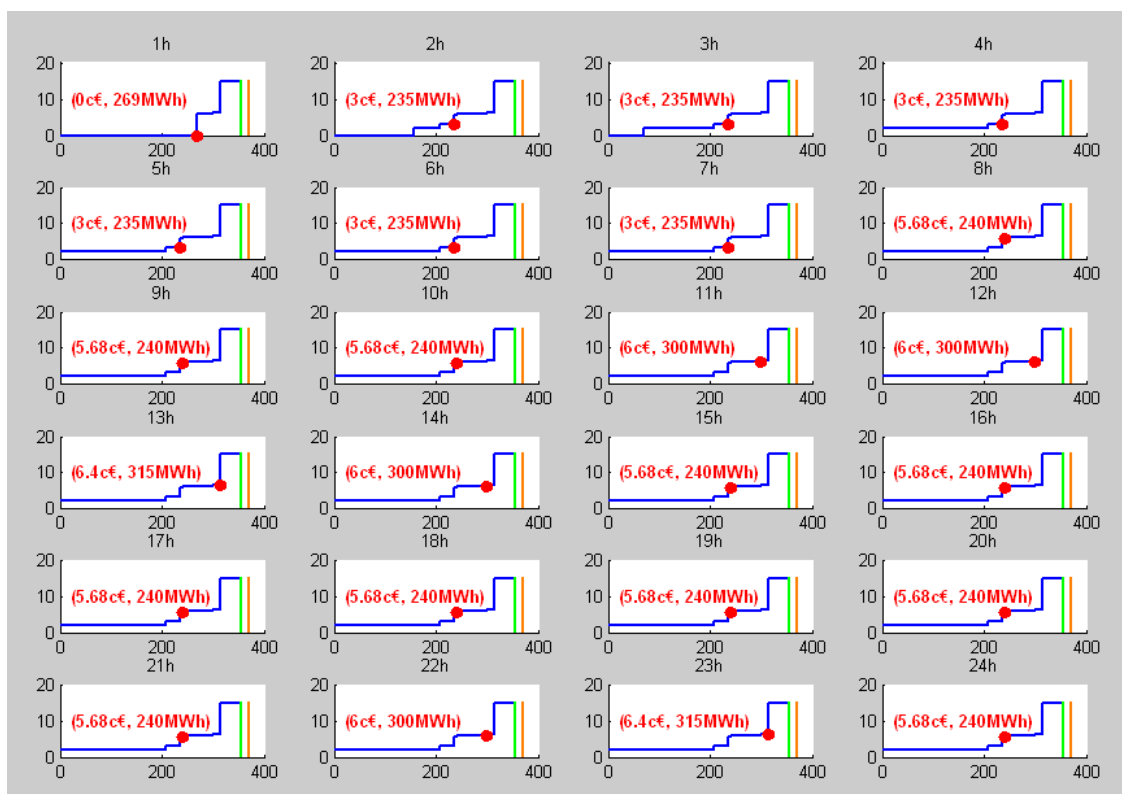
2.17: Corba d'oferta de la unitat ROB2 durant el dia 8 de maig de 2008 a les 15 hores

Gràfica de pendents:



2.18: Gràfics de pendents de la unitat ROB2 durant el dia 8 de maig de 2008 a les 15 hores

## Comportament de l'oferta del dia 11-14 i del 21-23 de maig:

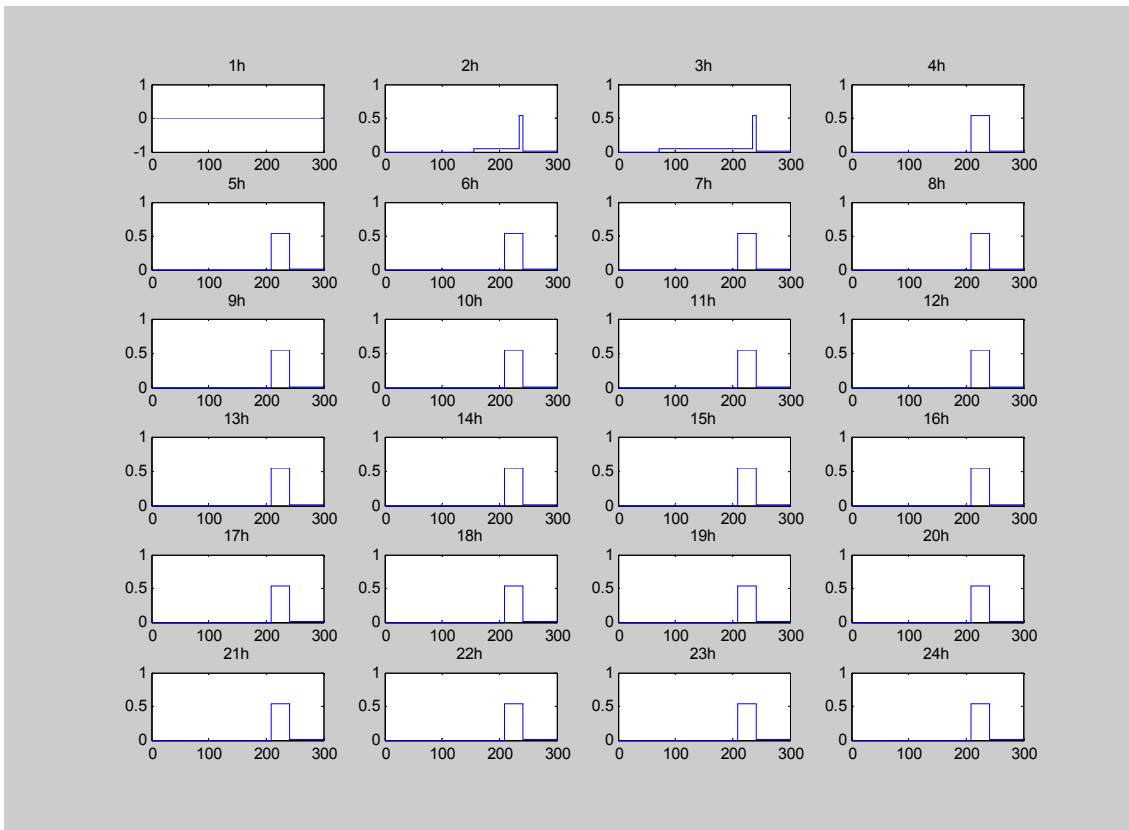


2.19: Corbes d'oferta de la unitat ROB2 durant el dia 12 de maig de 2008

Un altre cop a la 1:00h es casa a 0 cèntims, per la raó que acabem de comentar. De les 2:00h fins les 7:00h es casa a 3 cèntims i després al voltant de 6 cèntims. Si ens fixem, a mesura que avança el dia, es casa a un preu més elevat.

Una petita observació que podem fer és que en aquesta unitat s'oferta quasi a preu 0 €/MWh fins 200 MWh d'energia. En canvi a la unitat ALL1 s'oferta aproximadament a preu 0 €/MWh fins 150 MWh aproximadament.

Mirem el gràfic de pendents per veure per veure com es comporta:

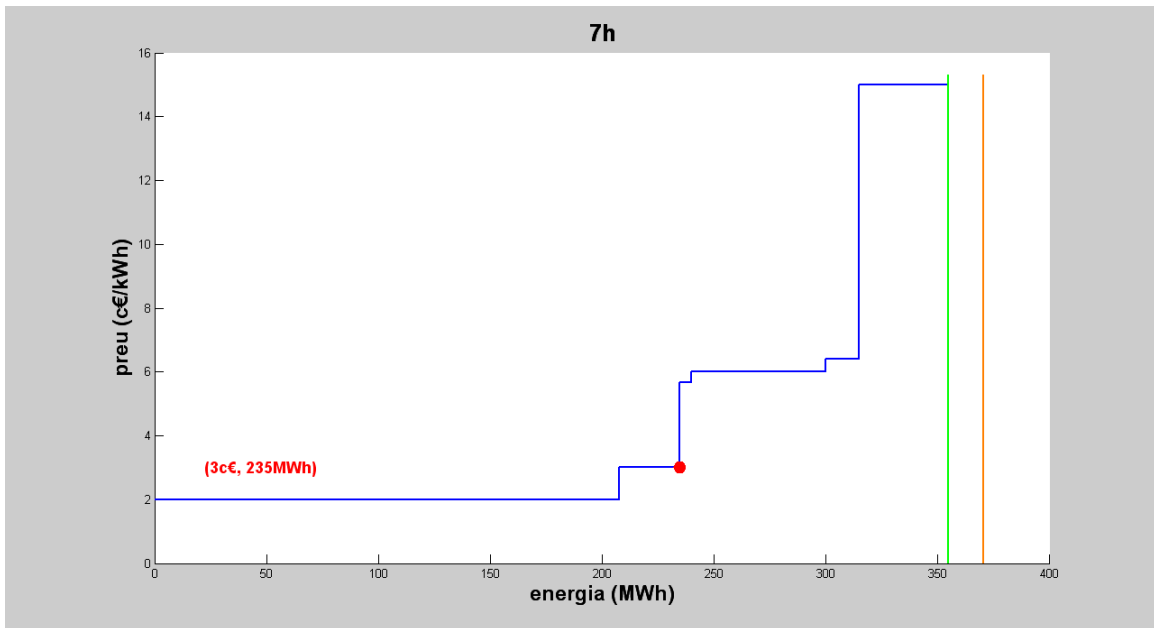


2.20: Pendents de la unitat ROB2 durant el dia 12 de maig de 2008

En aquest cas, cal destacar que al igual que en els anteriors casos, al segon tram mostra una pendent amb un valor aproximadament igual a 0,001 o 0,002, en aquest cas la pendent augmenta més, obtenint un valor de 0,55. A partir d'aquí, com en els casos anteriors, la pendent es torna constant i amb un valor igual a zero.

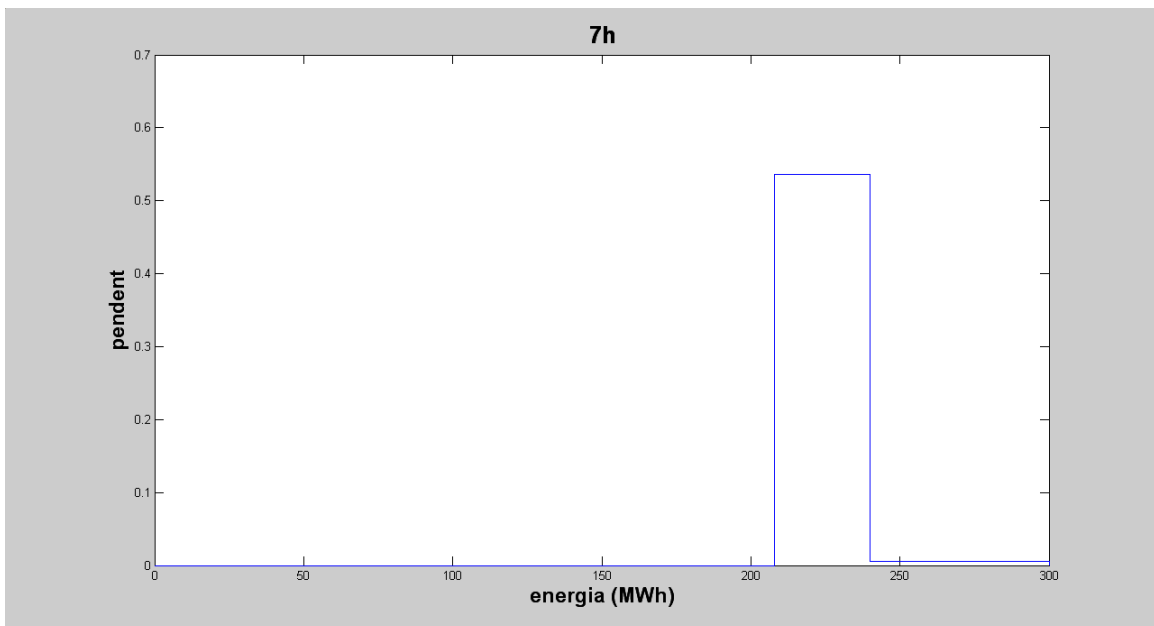
A continuació mostrarem una gràfica de la corba d'oferta i una de la seva pendent per a una hora determinada.

Gràfica de la corba d'oferta:



2.21: Corba d'oferta de la unitat ROB2 durant el dia 12 de maig de 2008 a les 7 hores

Gràfica de pendents:



2.22: Pendent de la unitat ROB2 durant el dia 12 de maig de 2008 a les 7 hores



## Comportament de l'oferta del dia Del 18-20 i del 29-31 de maig:

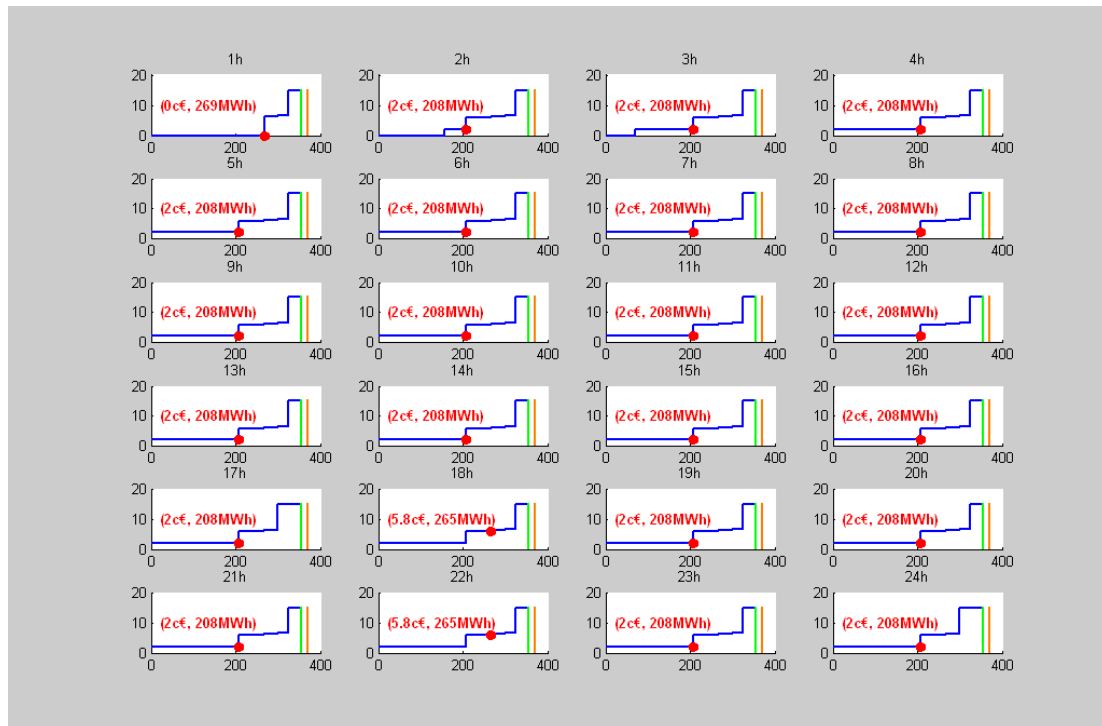


Fig. 2.23: Corbes d'oferta de la unitat ROB2 durant el dia 19 de maig de 2008

Com podem veure, a totes les hores del dia l'energia es casa a un preu de 2 cènt.€. El comportament de la corba d'oferta durant el dia a excepció de les 2 primeres hores, és idèntic. En concret, es comença ofertant l'energia a 2 cènt.€ fins als 200 MWh. A partir d'aquí, comença la part de la corba d'oferta amb pendent.

Ara observem el gràfic de pendents:

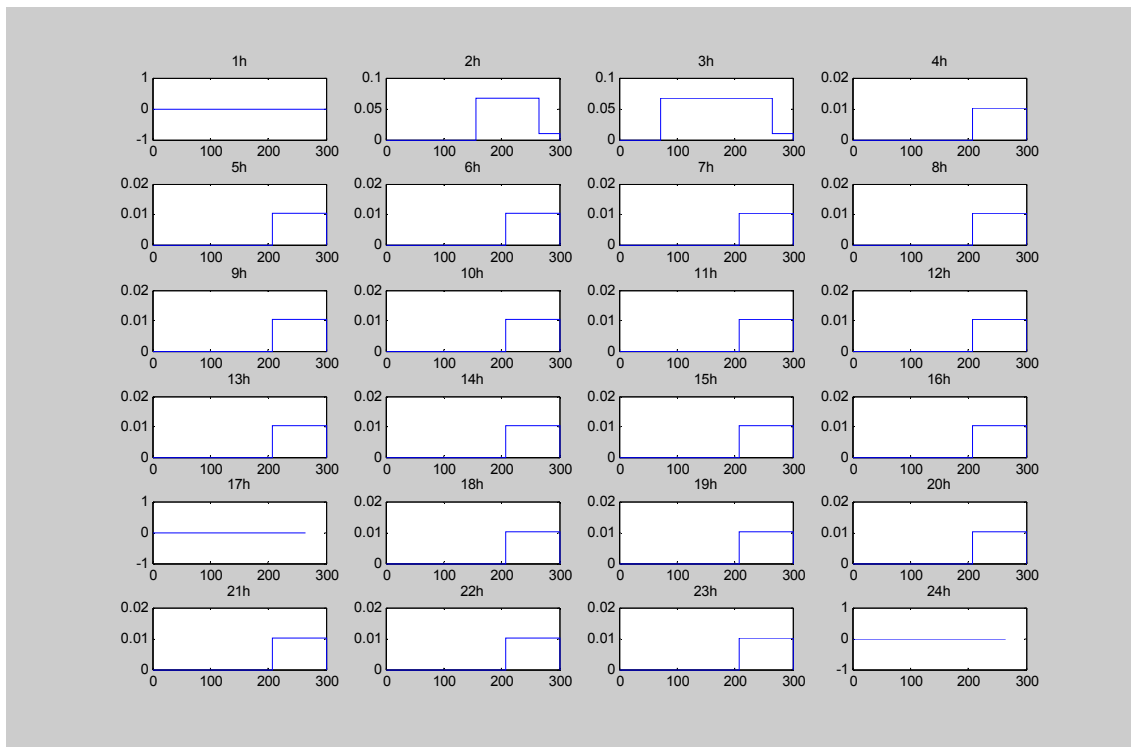


Fig. 2.24: Pendents de la corba d'oferta de la unitat ROB2 durant el dia 19 de maig de 2008

Com als anteriors casos, al primer tram la pendent és 0 i el següent tram té una pendent amb un valor de 0,01. És un comportament molt similar al que han mostrat fins ara tots els gràfics. Als gràfics que mostrarem a continuació veurem millor amb més precisió aquestes relacions.

Gràfica de la corba d'oferta:

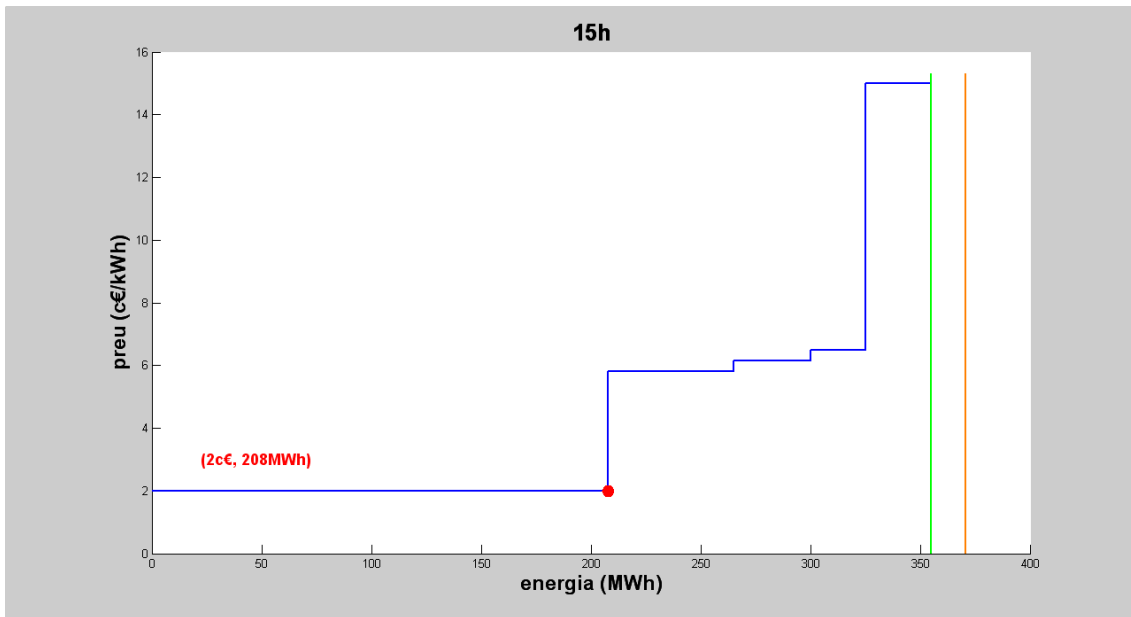


Fig. 2.25: Corba d'oferta de la unitat ROB2 durant el dia 19 de maig de 2008 a les 15 hores

Gràfica de pendents:

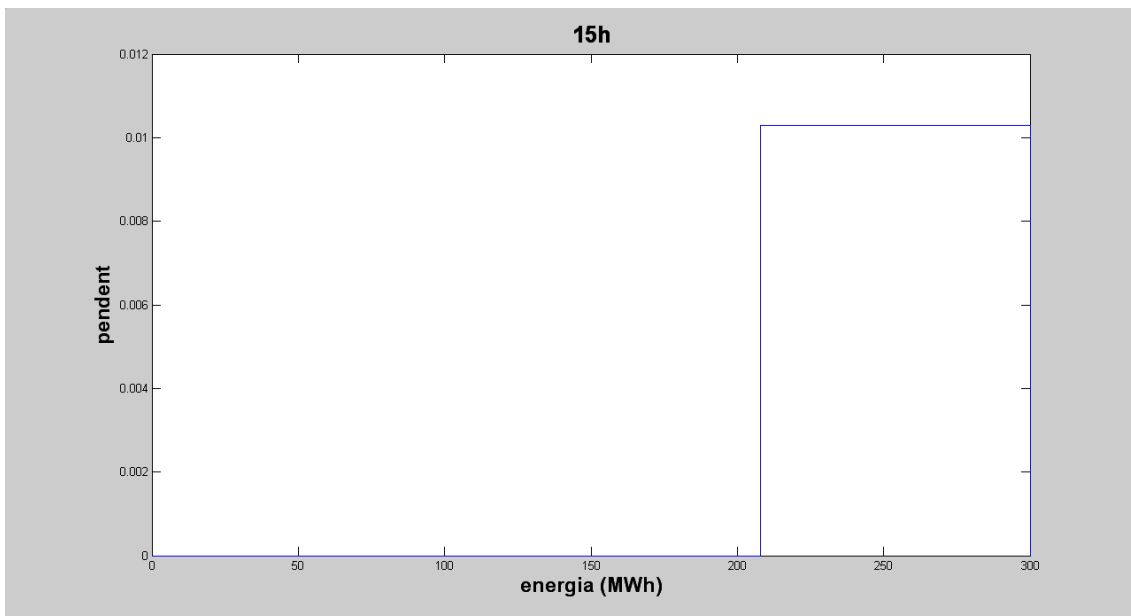
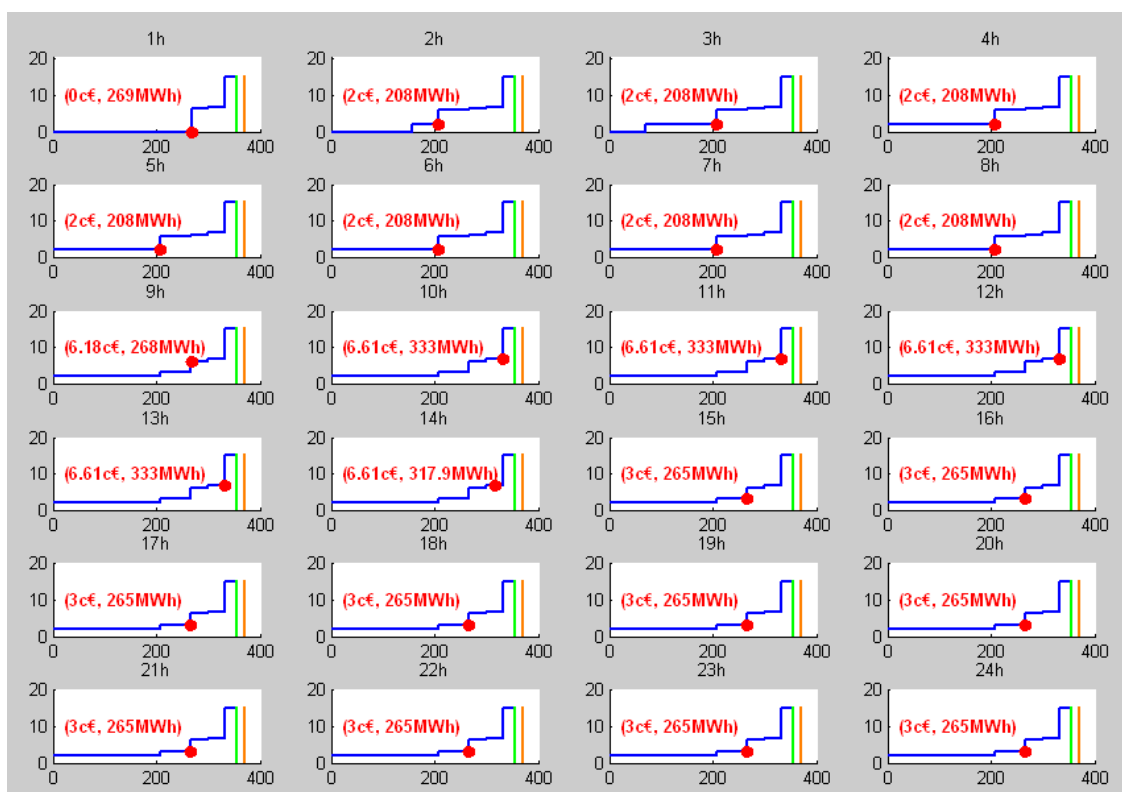


Fig. 2.26: Pendents de la corba d'oferta de la unitat ROB2 durant el dia 19 de maig de 2008 a les 15 hores.

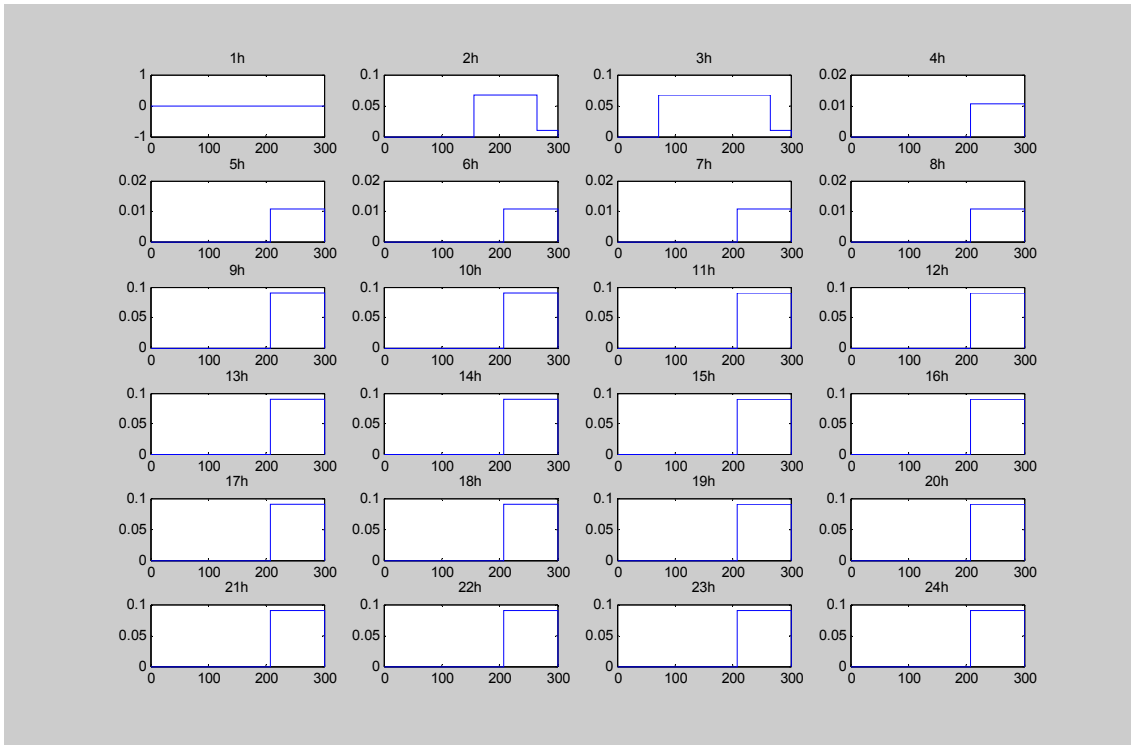
## Comportament de l'oferta del dia 24-28 de maig:



2.27: Corbes d'oferta de la unitat ROB2 durant el dia 27 de maig de 2008

A la 1:00h es casa a 0 cèntims com als altres períodes. De les 2:00h fins les 8:00h es casa a 2 cèntims, després fins les 18:00h es casa a 6,61 aproximadament i finalment a 3 cèntims. En aquest període, veiem com a mesura que va passant el dia, l'energia augmenta però després disminueix a 3 cèntims. Es la principal diferència d'aquest període en relació amb els altres que el preu de cassació de l'energia augmentava i no disminuïa.

Ara veurem les gràfiques de pendents corresponents als gràfics anteriors.



2.28: Pendents de la unitat ROB2 durant el dia 27 de maig de 2008

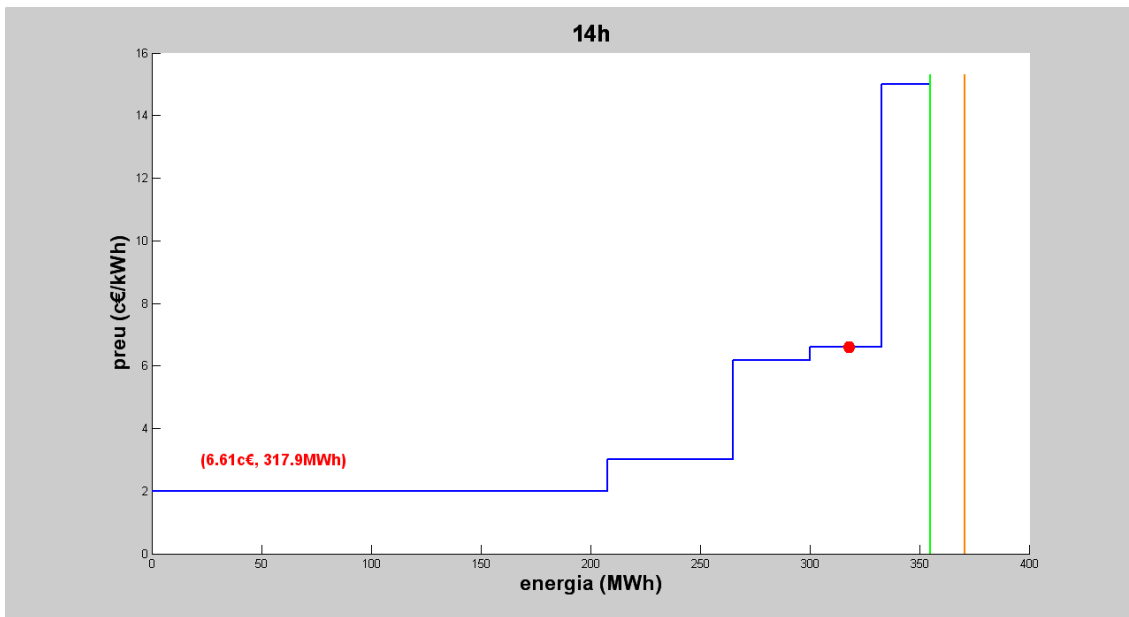
Un altre cop tenim el mateix comportament que als casos anteriors.

De 4 a 8 hores, la primera pendent diferent de zero val aproximadament 0,011.

A partir de les 9 hores, aquest comportament canvia i la primera pendent significativa té un valor aproximat de 0,09. Tant en un comportament com en l'altre després la pendent es manté constant amb valors propers al 0.

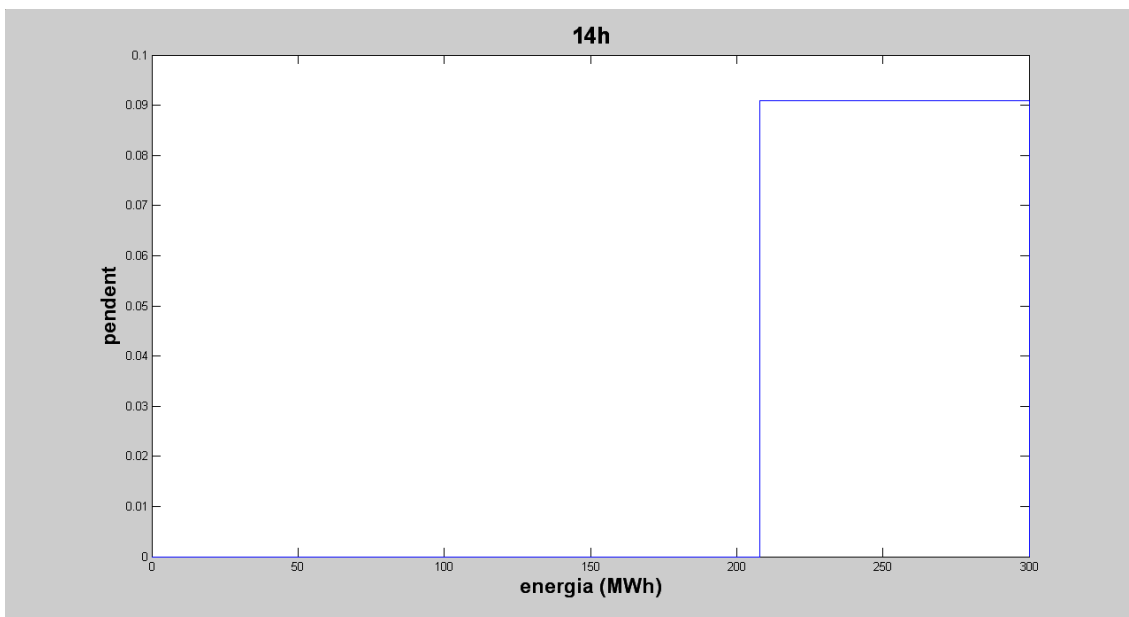
Per últim, veurem una gràfica de la corba d'oferta i una altra de la seva pendent corresponent.

Gràfica de la corba d'oferta:



2.29: Corba d'oferta de la unitat ROB2 el dia 27 de maig de 2008 a les 14 hores

Gràfica de pendents:



2.30: Pendent de la unitat ROB2 el dia 27 de maig de 2008 a les 14 hores

Després de l'anàlisi de les dues unitats tèrmiques ens adonem de que tenen comportaments molt semblants. Podríem dir que en la majoria dels casos el comportament és: la pendent comença valent 0 al primer tram d'oferta. A partir d'aquí, en alguns casos més clars que en altres, comença una forma d'ofertar lineal. Com he dit, en alguns casos aquesta forma lineal és veu clara, però en d'altres veiem que el valor de la pendent no és tan constant i que deuríem utilitzar un valor mig d'aquestes pendents per descriure de manera més exacta la forma d'ofertar.

Ara bé, hi han dos períodes de la unitat ROB2 (del dia 11-14 i 21-23 de maig i del 24-28 de maig) que observem un comportament una mica diferent a la resta. En aquests dos casos, el primer tram també és 0 però al segon tram la pendent augmenta de forma considerable. En el cas del període del dia 11-14 i 21-23 de maig augmenta fins 0,55 i en el cas del període 24-28 de maig no augmenta tant, però sí arriba fins 0,09, pendent considerablement més alta que en la resta de períodes.

Tots aquests aspectes que acabem de comentar es tindran en compte a l'apartat d'estimació de costos on s'explica perquè l'ajust lineal és una bona opció.

Per últim, només hem detallat la descriptiva de dos unitats tèrmiques perquè ens vam adonar que el comportament en les altres 6 restants era molt semblant. El fet de que el comportament en totes les unitats tèrmiques sigui molt semblant ens facilita l'estimació de costos que veiem al següent capítol.

## 2.5 Càlcul dels costos

L'objectiu d'aquest apartat és estimar el valor dels costos de generació de l'energia per a cada unitat tèrmica. Aquest costos són necessaris per poder aplicar correctament els models d'optimització que explicarem a la següent part d'aquest PFC. Els costos a estimar són els següents:

- $c_t^b$  Cost de generació constant de la unitat tèrmica t. (cént €)
- $c_t^l$  Cost de generació lineal de la unitat tèrmica t. (cént €/MWh)
- $c_t^q$  Cost de generació quadràtic de la unitat tèrmica t. (cént €/MWh<sup>2</sup>)

La funció que dóna com a resultat el cost total de generació energètica de cada tèrmica, té com a paràmetres aquests tres coeficients i la podem expressar de la següent forma:

$$C_t(E) = c_t^b + c_t^l E + c_t^q E^2$$

On  $C(E)$  es el cost total de generació en euros, i  $E$  es l'energia que volem generar.

Per trobar aquests costos utilitzem uns resultats de l'article Corchero-Heredia[2] on es va deduir (Lema 4) l'expressió teòrica de la corba d'oferta òptima per a una GenCo que ofertés al mercat diari de l'OMEL. L'expressió matemàtica d'aquesta corba és:

$$\lambda(E) = \begin{cases} 0 & E \leq q_{it} \\ 2c_t^q E + c_t^l & q_{it} < E \leq \bar{P}_t \end{cases}$$

on  $\lambda(E)$  representa el preu al que s'ha d'ofertar l'energia  $E$  per tal de maximitzar els beneficis de la GenCo.  $\bar{P}_t$  és la potència màxima de generació de la tèrmica i  $q_{it}$  és l'energia ofertada a preu zero. La figura 2.27 conté la representació gràfica d'aquesta corba.



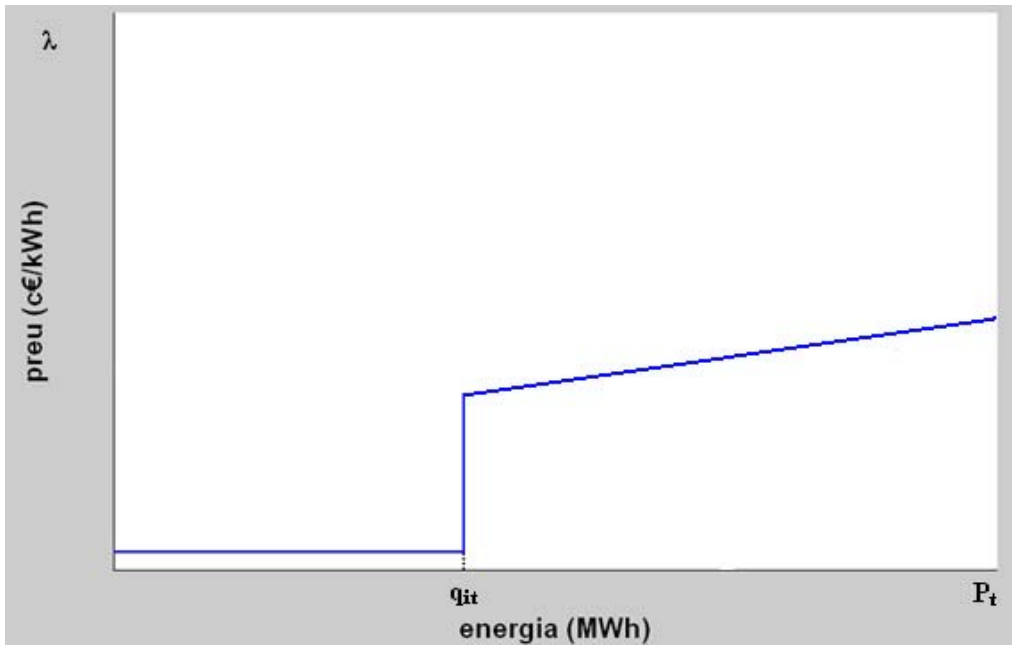


Fig 2.31: Model teòric de corba d'oferta

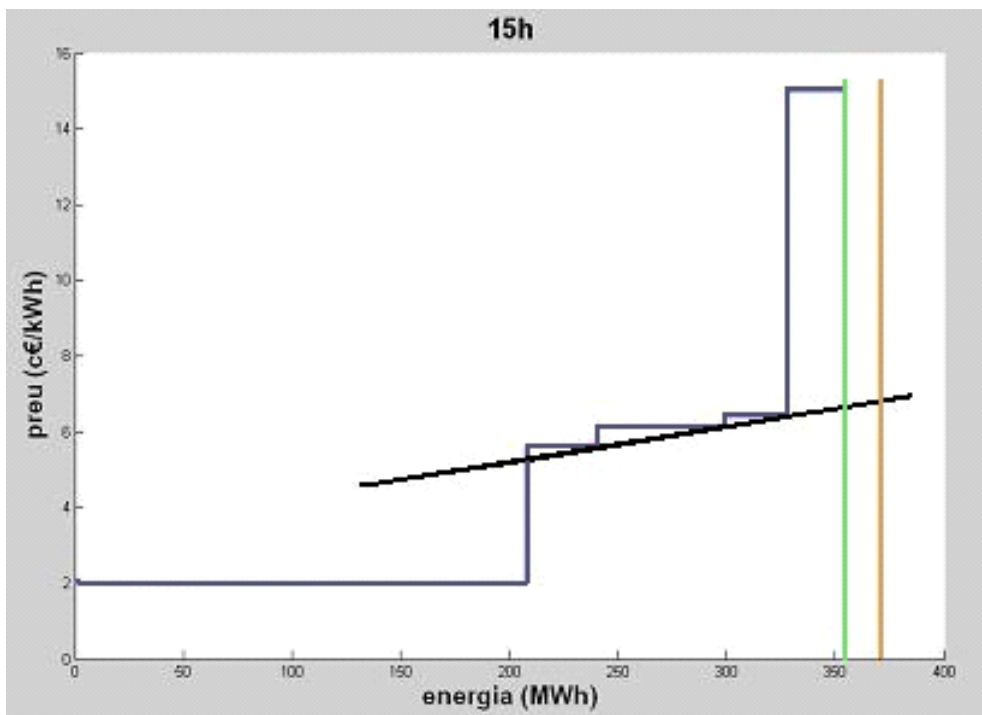


Fig. 2.32: Procediment d'ajust lineal de la corba d'oferta

Per tant, ara estimarem cada una d'aquestes rectes per a cada unitat tèrmica.

El preu d'oferta per a cada tèrmica, després de realitzar l'estimació vindrà donada per la següent expressió:

$$\lambda = a_t E + b_t$$

on  $a_t$  i  $b_t$  són els coeficients de les rectes estimades per regressió lineal, corresponents a la tèrmica  $t$ .

Per tant, sabent que:

$$\lambda = a_t E + b_t \quad \text{i que} \quad \lambda = 2c^q E + c^l$$

Tenim que per a cada tèrmica, els coeficients són els següents (el factor 1000 és necessari per tenir les unitats en MWh):

$$c_i^q = \left(\frac{a_t}{2}\right) \cdot 1000 \quad c_i^l = b_t \cdot 1000$$

Les estimacions<sup>7</sup> per a cada tèrmica dels coeficients de les rectes estimades de la seva corba d'oferta són les següents:

$$\lambda \begin{bmatrix} ALL1 \\ ROB1 \\ ROB2 \\ NRC1 \\ NRC2 \\ NRC3 \\ SBO1 \\ SBO2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,00224 \\ 0,005 \\ 0,003 \\ 0,01 \\ 0,022 \\ 0,00198 \\ 0,001 \\ 0,0246 \end{bmatrix} E + \begin{bmatrix} 5,15 \\ 5,27 \\ 5,191 \\ 14,476 \\ 3,6 \\ 5,16 \\ 13,354 \\ 7,16 \end{bmatrix}$$

Un cop fet això, podem obtenir els costos de generació lineals i quadràtics amb les fórmules anteriors. El resultat són els següents:

Tèrmica	$c^q$	$c^l$
ALL1	1,12	5150
ROB1	2,5	5270
ROB2	1,5	5191
NRC1	5	14476
NRC2	11	3600
NRC3	0,99	5160
SBO1	0,5	13354
SOB2	12,3	7160

Taula 2.1: Unitats tèrmiques amb els seus costos lineals i quadràtics

<sup>7</sup> Tant les estimacions de les rectes, com els càlculs realitzats es troben detallats als annexos

Un cop calculats els costos quadràtics i lineals de cada unitat tèrmica, només ens queda calcular els costos bàsics de generació. Per fer això, ens ajudarem d'unes dades de les que disposa el Departament d'estadística i investigació operativa. El problema és que aquestes dades són de l'any 2006 i caldrà fer una actualització degut a que els preus del combustible han variat al llarg dels anys. Les dades són les següents:

Tèrmica	Cost c€/kWh	$c^b$	$c^l$	$c^q$
ALL1	2	151079	4036,83	1,4881
ROB1	2	97559,988	4387,618	0
ROB2	2	327021	2884,87	3,59089
NRC1	2	64972,222	4580,333	0
NRC2	2	366077	1372,47	27,4232
NRC3	2	197932	3690,53	1,96344
SBO1	4,8	276743,21	7160	12,3
SBO2	-	372138,4	10508,17	0

Taula 2.2: dades a l'any 2006 on  $\underline{c}^b$ ,  $\underline{c}^l$ ,  $\underline{c}^q$  són els costos bàsic, lineal i quadràtic.

Sabem que:

$$C(E) = \alpha (\tilde{c}^b + \tilde{c}^l E + \tilde{c}^q E^2) = \alpha \tilde{c}^b + \alpha \tilde{c}^l E + \alpha \tilde{c}^q E^2$$

On cada una de les constants que apareixen a la última igualtat corresponen als costos  $\underline{c}^b$ ,  $\underline{c}^l$ ,  $\underline{c}^q$ ,  $\alpha$  és el cost de mercat del combustible i els costos bàsics, lineals i quadràtics relatius a la unitat, independentment del preu de mercat. Això ens permet calcular els costos relatius a la unitat tèrmica, per després calcular el preu del combustible actual i d'aquesta manera trobar el cost de generació constant. El procediment de càlcul serà el següent:

- Calcular  $\tilde{c}^b = \frac{\underline{c}^b}{\alpha^{2006}}$ ,  $\tilde{c}^l = \frac{\underline{c}^l}{\alpha^{2006}}$  i  $\tilde{c}^q = \frac{\underline{c}^q}{\alpha^{2006}}$
- Calcular  $\alpha^{2009} = \frac{c^l}{\tilde{c}^l} \approx \frac{c^q}{\tilde{c}^q}$
- Calcular  $c^b = \tilde{c}^b \alpha^{2009}$

D'aquesta manera, completem la taula amb els costos de generació constants per a cada tèrmica:

Unitat	$c^b$
ALL1	192739,563
ROB1	117180,014
ROB2	588437,611
NRC1	205342,687
NRC2	484364,44
NRC3	261888,134
SBO1	472921,184
SBO2	276743,21

Taula 2.3: Unitats tèrmiques amb l'estimació del seu cost bàsic

### 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 escenaris<sup>8</sup>.

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

---

<sup>8</sup> 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:

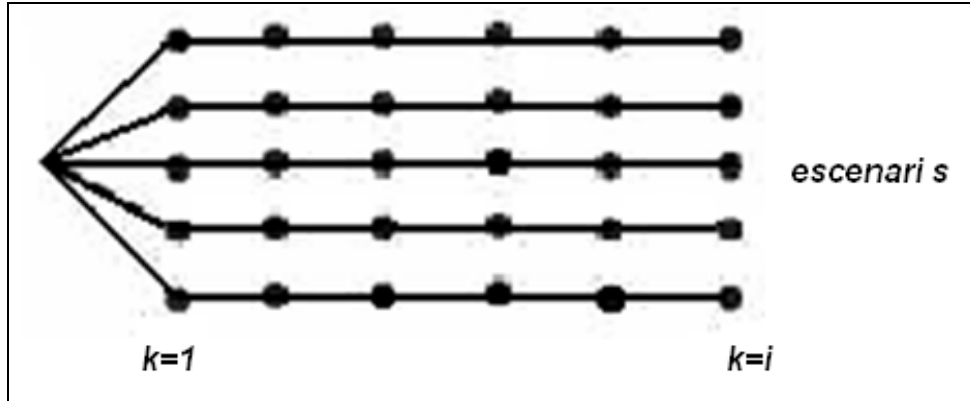


Fig. 3.1: Gràfic explicatiu dels diferents escenaris per a cada període de temps.

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  $P^s$ .<sup>9</sup>

### 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  $j$ .

<sup>9</sup> 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. €/MWh<sup>2</sup>)
- $P^s$  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
<b>Aturada</b>	1	0	0	1	0
<b>Enggada</b>	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. Així 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:

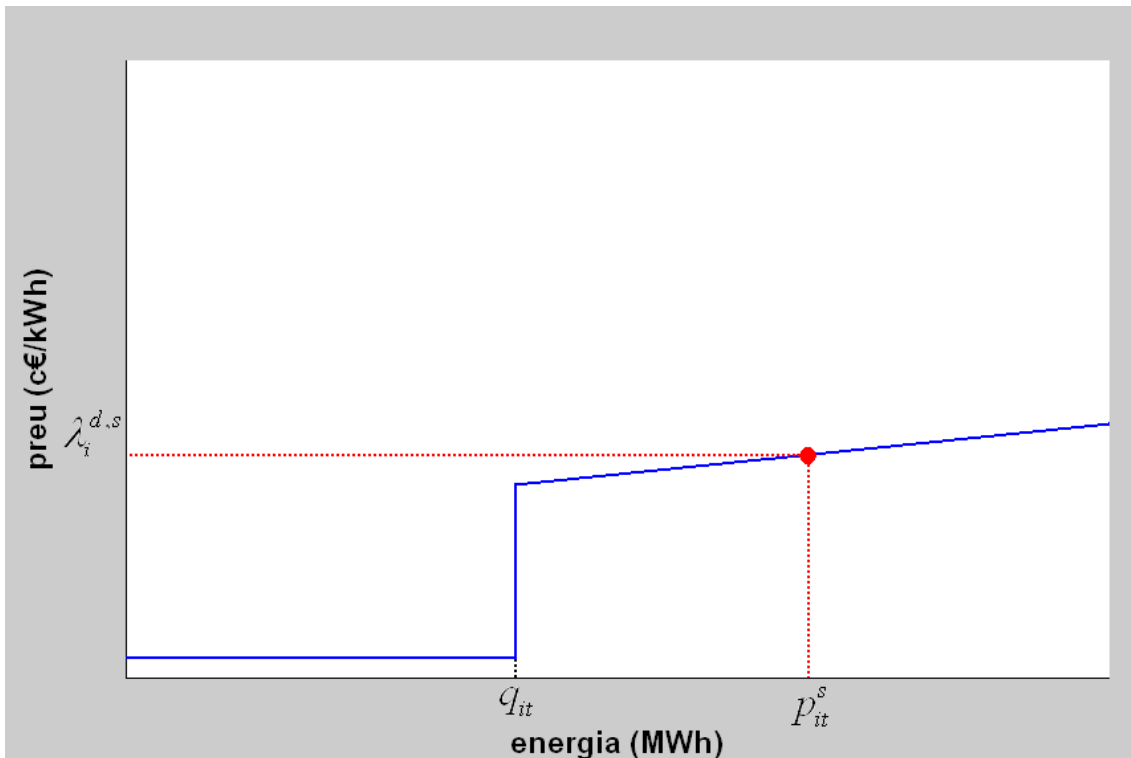


Fig. 3.2: Gràfica que mostra la relació entre la potència òptima cassada i el preu de cassació

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:

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

- Aturada:

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

- 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 \*.mod<sup>10</sup>

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.

---

<sup>10</sup> 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.<sup>11</sup>

### 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:

---

<sup>11</sup> 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
<b>Promig:</b>			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:

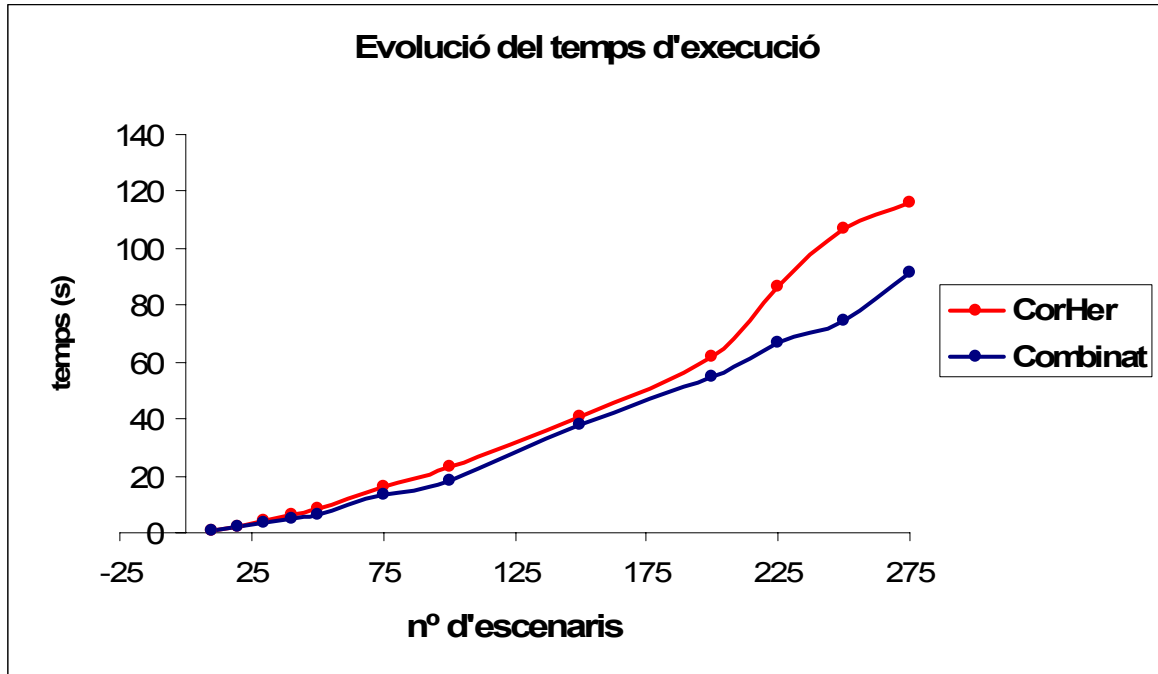


Fig. 4.1: Gràfic que mostra el temps d'execució de cada model per a diferent nº d'escenaris

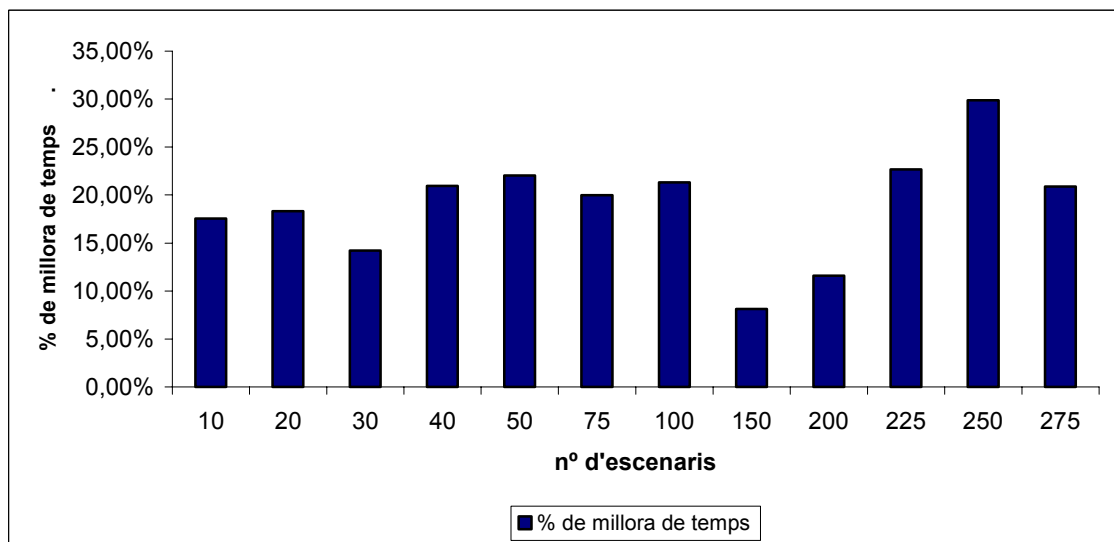


Fig. 4.2: Gràfic que mostra el percentatge de millora de temps del model combinat

## 5 CONCLUSIONS

L'objectiu d'aquest projecte ha estat realitzar un estudi sobre la oferta de l'energia al mercat elèctric ibèric i posteriorment, optimitzar aquesta oferta de manera que maximitzi els beneficis. A la vegada que hem realitzat la part d'optimització, hem comparat dos models per veure la eficiència de cada un i saber quin utilitzar posteriorment. A continuació explicarem amb més detall tots els passos que hem fet durant la realització d'aquest projecte i les conclusions a les que hem arribat durant la realització d'aquest.

En primer lloc, després d'entendre el funcionament del mercat elèctric, el nostre problema consistia en l'obtenció de les dades referents als preus de venda de l'energia. Això es va resoldre amb una sèrie de rutines que ens permeten de forma automàtica, aconseguir les dades d'oferta i contractes bilaterals de qualsevol unitat tèrmica.

Un cop fet això el següent pas ha estat realitzar un estudi descriptiu de l'oferta de l'energia per part de les diferents tèrmiques, per poder entendre millor el seu comportament. Gràcies a aquest primer estudi descriptiu, hem vist que la corba d'oferta sempre seguia el mateix comportament. En concret, sempre començava amb un preu d'oferta constant, fins que, a partir d'un cert moment es començava a ofertar d'una forma que semblava lineal.

A partir d'aquí, el següent pas va ser estimar els coeficients de cada una d'aquestes rectes ja que ens servirien també per calcular el valor dels costos de generació necessaris per dur a terme la següent part del projecte.

Tal com hem dit, ara calia un model d'optimització amb el qual trobar la oferta òptima. D'una banda, teníem el model realitzat per F. Javier Heredia i Cristina Corchero i per altra, un altre model desenvolupat per José M. Arroyo i Miguel Carrión[1]. La diferència entre aquests dos models radica en què el primer incorpora una formulació que té en compte els contractes de futurs, i que el segon model formula una part de les constriccions d'una manera més eficient.

El nostre objectiu doncs, ha estat crear un model combinat basat en el primer model, però que incorpori la formulació de l'altre model que, a priori, és millor.

Un cop construït aquest model combinat, ja podíem realitzar proves amb el model Corchero-Heredia i el model combinat, amb l'objectiu de comparar resultats, i sobretot, fixar-nos en el temps d'execució de cada un d'ells.

Els models van ser resolts amb el software d'optimització AMPL[3] i executats en igualtat de condicions des del mateix computador. Els resultats, com hem explicat amb més detall en apartats anteriors, ens mostraven que mentre que els models presentaven diferències poc importants en referència al nombre de constriccions i variables, en la part referent al temps d'execució s'aprecia com el model combinat és, en promig, un 18,96% més ràpid, amb la qual cosa aconsellem la seva utilització en detriment del primer model.

## BIBLIOGRAFIA

[1] Arroyo, José M. ; Carrión, Miguel. *A computationally efficient mixed-integer linear formulation for the thermal unit commitment problem*. Institute of Electrical and Electronics Engineers transactions on power systems, vol. 21, nº3, agost 2006.

[2] Corchero, Cristina; Heredia, F. Javier. *A stochastic programming model for the thermal optimal day-ahead bid problem with physical futures contracts*. Departament d'estadística i investigació operativa de la Universitat Politècnica de Catalunya.

[3] Fourer, Robert. *AMPL : a modeling language for mathematical programming*. Pacific Grove, CA : Thomson/Brooks/Cole, cop. 2003

[4] CPLEX Division. *CPLEX 2008: Cplex optimization sobroutine library guide and reference*. ILOG Inc.. Incline Village, NV, USA.

[5] Murtagh, B.A. and Sauntlers, M.A. *MINOS 5.0 User's guide*. Dept. of Operations Research, Standfortl University, CA 9430, USA 1983.

[6] Vila Jofre, Elisenda. *Generació d'escenaris per a l'optimització de l'oferta al mercat elèctric*. PFC de la Diplomatura d'Estadística de la UPC (Setembre 2007).

[7] J.R. Birge, F. Louveaux. *Introduction to Stochastic Programming*. Editorial Springer 1997.

[8] Roso Llorach, Albert. *Reducció d'Escenaris per a l'Optimització de l'Oferta del Mercat Elèctric*. PFC de la Diplomatura d'Estadística de la UPC (Setembre 2007).

## Annex 1: Arxius i fitxers de dades de la memòria

Tots els arxius i fitxers de dades necessaris per entendre i poder dur a terme tot el procés descrit a aquest PFC, es poden trobar al següent link:

<http://www-eio.upc.es/~heredia/files/Annexos.zip>

L'arxiu té com a nom *Annexos.zip* i l'estructura de carpetes i arxius d'aquest és el següent:

### - Extracció i anàlisi de dades

- **Càlcul dels costos:** Conté un arxiu Excel amb els càlculs dels costos de generació de l'apartat 2.5.
- **Dades i generació de gràfics amb Matlab:** Aquí trobarem tots els fitxers necessaris per executar gràfiques com les mostrades a l'anàlisi descriptiu (apartat 2.4). Dins d'aquesta carpeta trobarem:
  - **aTxtCasada:** Conté els fitxers de dades en format .m de l'energia cassada per les unitats tèrmiques estudiades al PFC.
  - **aTxtOfertada:** Conté els fitxers de dades en format .m de l'energia ofertada per les unitats tèrmiques estudiades al PFC.
  - **aTxtCB26:** Conté els fitxers de dades en format .m de l'energia contractada a futurs per les unitats tèrmiques estudiades al PFC.
  - **aTxtCB27:** Ídem que l'anterior.
  - **aTxtUnitats:** Conté els fitxers de dades en format .m de les dades com potència mínima i màxima de les unitats tèrmiques estudiades al PFC.
  - **Scripts Matlab:** Conté tots els scripts en format .m necessaris per la realització dels gràfics de l'anàlisi descriptiu.
- **Descàrrega de fitxers:** Conté els scripts necessaris per la descàrrega de dades i fer el formatat detallat als apartats 2.2.1 i 2.2.2.
- **Estimació de les rectes:** Conté un arxiu amb els resultats de les estimacions de les rectes citades a l'apartat 2.5.

- **Obtenció de dades:** Conté els scripts necessaris per crear les consultes extretes de les dades del mercat diari i posteriorment convertir-les a format .m (apartats 2.2.3, 2.2.4 i 2.2.5).

- **Obtenció de dades contractes de futurs:** Conté els scripts necessaris per crear les consultes extretes de les dades dels contractes de futurs i posteriorment convertir-les a format .m (apartats 2.2.6, 2.2.7 i 2.2.8).

- **Resolució dels models en AMPL:** en aquest directori trobarem una carpeta amb els arxius necessaris per a la resolució dels dos models estudiats. El nom de les carpetes és “num escenaris” on num és el nombre d’escenaris que tenen els fitxers de dades continguts dins de la carpeta.

## Annex 2: Fitxers de la implementació en AMPL

En aquest annex inclourem els arxius AMPL amb 10 escenaris necessaris per a la resolució dels dos models.

**-corher.run:**

```
#####  
# PARAMETRES  
#####  
###Parametres Intervals###  
param nI >0 integer;  
set I := 1..nI ordered;  
let nI:=24;  
###Parametres Units###  
param nT >0 integer;  
set T:= 1..nT;  
let nT:=8;  
###Parametres UCPs###  
param nU integer;  
set U{1..nU} within T;
```

```

param L{1..nU} >0 integer;
###Paràmetres escenaris i preus###
param nScen integer;
set Scen := 1..nScen ordered;
param Prob{ Scen };
param PreuD{l, Scen };
###Pametres unitats###
param stat {T} ;
param Coston {T};
param Costoff {T};
param Cb {T} ;
param Cl {T} ;
param Cq {T} ;
param Ton {T} > 0 integer;
param Toff {T} > 0 integer;
param Pmin {T} >=0;
param Pmax {T} >=0;
#####
###Variables Model II###
var a {T, l} binary; ##State of the unit - off
var e {T, l} binary; ##State of the unit - on
var u {T, l} binary; ##State of the unit
#####
###Resolució Model II###
model corher.mod;
data corher.dat;
option show_stats 1;
option times 1;
option solver cplexamp;
problem M_II: a, e, u, g, p, q, fo, pq, qg, fc, ol_1, ol_2, ol_3, uc_1, uc_2, uc_3,
uc_3a, uc_4, uc_4a;
options cplex_options $cplex_options 'mipgap = 0 ';
options cplex_options $cplex_options 'absmipgap = 0 ';
options cplex_options $cplex_options 'timing = 1 ';

```



```

solve M_II;
display solve_message > result_II.res;
display solve_result_num > result_II.res;
display solve_result > result_II.res;
display _total_solve_time > result_II.res;
display fo > result_II.res;
display a > a_II.res;
display e > e_II.res;
display u > u_II.res;
display g > g_II.res;
display q > q_II.res;
display p > p_II.res;
reset;

```

**-corher.mod:**

```

#####
# VARIABLES
#####
var g {T, I, j in 1..nU} >= 0; ##Economic Dispatch for each UCP
var q {t in T, I}; ##Instrumental price bid
var p {T, I, s in Scen}; ##Matched Energy
#####
# OBJECTIVE FUNCTION
#####
minimize fo:
sum {i in I} (sum {t in T}(Coston[t]*e[t,i] + Costoff[t]*a[t,i] + Cb[t]*u[t,i] +
    sum {s in Scen} (Prob[s]*((Cl[t]-PreuD[i,s]*1000)*p[t,i,s] + Cq[t]*p[t,i,s]^2))));
#####
# CONSTRAINTS
#####
### Constraints coupling p and q:
subject to pq {t in T, i in I, s in Scen}:
    q[t,i] <= p[t,i,s] ;

```

### Constraints coupling q and g:

subject to qq {t in T, i in I}:

$$q[t,i] \geq \sum\{j \text{ in } 1..nU\} g[t,i,j];$$

### Forward futures constraints:

subject to fc {i in I, j in 1..nU}:

$$\sum\{t \text{ in } U[j]\} g[t,i,j] = L[j];$$

### Operational limits constraints:

subject to ol\_1 {t in T, i in I, s in Scen}:

$$p[t,i,s] - Pmax[t]*u[t,i] \leq 0;$$

subject to ol\_2 {t in T, i in I, s in Scen}:

$$p[t,i,s] - Pmin[t]*u[t,i] \geq 0;$$

subject to ol\_3 {t in T, i in I, s in Scen}:

$$q[t,i] - Pmin[t]*u[t,i] \geq 0;$$

### Unit commitment constraints:

subject to uc\_1 {t in T, i in I}:

$$a[t,i] + e[t,i] \leq 1;$$

subject to uc\_2 {t in T, i in I}:

$$\begin{aligned} & \text{(if } i <> \text{first}(I) \text{ then } (u[t,i] - u[t,i-1] - e[t,i] + a[t,i]) \\ & \quad \text{else if } \text{stat}[t] < 0 \text{ then } u[t,i] - 0 - e[t,i] + a[t,i] \\ & \quad \text{else } u[t,i] - 1 - e[t,i] + a[t,i]) = 0; \end{aligned}$$

subject to uc\_3 {t in T, i in I}:

$$e[t,i] + (\sum\{j \text{ in } i.. \min(i + \text{Ton}[t], nI)\} a[t,j]) \leq 1;$$

subject to uc\_3a {t in T, i in 1..max(0, (stat[t]/abs(stat[t]))\*(Ton[t]-stat[t]))}:

$$a[t,i] = 0;$$

subject to uc\_4 {t in T, i in I}:

$$a[t,i] + (\sum\{j \text{ in } i.. \min(i + \text{Toff}[t], nI)\} e[t,j]) \leq 1;$$

subject to uc\_4a {t in T, i in 1..max(0, (-stat[t]/abs(stat[t]))\*(Toff[t]+stat[t]))}:

$$e[t,i] = 0;$$

**-combinat.run:**

```
#####  
# PARAMETRES  
#####  
###Parametres Intervals###  
param nl >0 integer;  
set I := 1..nl ordered;  
let nl:=24;  
###Parametres Units###  
param nT >0 integer;  
set T:= 1..nT;  
let nT:=8;  
###Parametres UCPs###  
param nU integer;  
set U{1..nU} within T;  
param L{1..nU} >0 integer;  
###Pametres escenaris i preus###  
param nScen integer;  
set Scen := 1..nScen ordered;  
param Prob{ Scen };  
param PreuD{l, Scen };  
###Pametres unitats###  
param stat {T} ;  
param Coston {T};  
param Costoff {T};  
param Cb {T} ;  
param Cl {T} ;  
param Cq {T} ;  
param Ton {T} > 0 integer;  
param Toff {T} > 0 integer;  
param Pmin {T} >=0;  
param Pmax {T} >=0;  
param Gon {t in 1..nT}:= if stat[t]<0 then 0 else (Ton[t]-stat[t]);
```

```

param Loff {t in 1..nT}:= if stat[t]>0 then 0 else (Toff[t]+stat[t]);
#####
###Variables Model II###
var u {T, I} binary; ##State of the unit
#####
###Resolució Model II###
model combinat.mod;
data combinat.dat;
option show_stats 1;
option times 1;
option solver cplexamp;
problem M_II: u, cd, cu, g, p, q, fo, pq, qg, fc, ol_1, ol_2, ol_3, cu_1, cd_1, tc_6,
tc_7, tc_8, tc_9, tc_10, tc_11;
options cplex_options $cplex_options 'mipgap = 0 ';
options cplex_options $cplex_options 'absmipgap = 0 ';
options cplex_options $cplex_options 'timing = 1 ';
solve M_II;
display solve_message > result_II.res;
display solve_result_num > result_II.res;
display solve_result > result_II.res;
display _total_solve_time > result_II.res;
display fo > result_II.res;
display u > u_II.res;
display cd > cd_II.res;
display cu > cu_II.res;
display g > g_II.res;
display q > q_II.res;
display p > p_II.res;
reset;

```

**-combinat.mod:**

```
##### MODEL REPORT II - Feb 08 #####
#####
# VARIABLES
#####
var g {T, I, j in 1..nU} >= 0; ##Economic Dispatch for each UCP
var q {t in T, I}; ##Instrumental price bid
var p {T, I, s in Scen}; ##Matched Energy
var cd {T,I} >= 0; ##cost off (mi)
var cu {T,I} >= 0; ##cost on (mi)
#####
# OBJECTIVE FUNCTION
#####
minimize fo:
sum {t in T} (sum {i in I}(cu[t,i] + cd[t,i] + Cb[t]*u[t,i]+
    sum {s in Scen} (Prob[s]*((Cl[t]-PreuD[i,s]*1000)*p[t,i,s] + Cq[t]*p[t,i,s]^2)))));
#####
# CONSTRAINTS
#####
### Constraints coupling p and q:
subject to pq {t in T, i in I, s in Scen}:
    q[t,i] <= p[t,i,s] ;
### Constraints coupling q and g:
subject to qg {t in T, i in I}:
    q[t,i] >= sum{j in 1..nU} g[t,i,j];
### Forward futures constraints:
subject to fc {i in I, j in 1..nU}:
    sum{t in U[j]} g[t,i,j] = L[j];
### Operational limits constraints:
subject to ol_1 {t in T, i in I, s in Scen}:
    p[t,i,s] - Pmax[t]*u[t,i]<=0;
subject to ol_2 {t in T, i in I, s in Scen}:
    p[t,i,s] - Pmin[t]*u[t,i]>=0;
```

subject to ol\_3 {t in T, i in I, s in Scen}:  
 $q[t,i] - Pmin[t]*u[t,i] \geq 0;$

### Unit commitment constraints:

#12 (mi)  
subject to cu\_1 {t in T, i in I}:  
(if i <> first(I) then Coston[t]\*(u[t,i]-u[t,i-1])  
else if stat[t]<0 then Coston[t]\*(u[t,i])  
else Coston[t]\*(u[t,i]-1)) <= cu[t,i];

#14 (mi)  
subject to cd\_1 {t in T, i in I}:  
(if i <> first(I) then Costoff[t]\*(u[t,i-1]-u[t,i])  
else if stat[t]<0 then -Costoff[t]\*u[t,i]  
else Costoff[t]\*(1-u[t,i])) <= cd[t,i];

#21(mi)  
subject to tc\_6 {t in T}:  
sum{i in 1..Gon[t]} (1-u[t,i])=0;

#22 (mi)  
subject to tc\_7 {t in T, i in Gon[t]+1..nl-Ton[t]+1}:  
(if i <> 1 then Ton[t]\*(u[t,i]-u[t,i-1])  
else if stat[t]<0 then Ton[t]\*u[t,i]  
else Ton[t]\*(u[t,i]-1)) <= sum{k in i..i+Ton[t]-1} u[t,k];

#23 (mi)  
subject to tc\_8 {t in T, i in nl-Ton[t]+2..nl}:  
(if i <> 1 then sum{k in i..nl} (u[t,k]-u[t,i]+u[t,i-1])  
else if stat[t]<0 then sum{k in i..nl} (u[t,k]-u[t,i])  
else sum{k in i..nl} (u[t,k]-u[t,i]+1)) >= 0;

#24 (mi)  
subject to tc\_9 {t in T}:  
sum {i in 1..Loff[t]} u[t,i]=0;

#25 (mi)  
subject to tc\_10 {t in T, i in Loff[t]+1..nl-TOff[t]+1}:  
(if i <> 1 then Toff[t]\*(u[t,i-1]-u[t,i])  
else if stat[t]<0 then -TOff[t]\*u[t,i]  
else Toff[t]\*(1-u[t,i])) <= sum{k in i..i+TOff[t]-1} (1-u[t,k]);

```

#26 (mi)
subject to tc_11 {t in T, i in nl-Toff[t]+2..nl}:
(if i<>1 then sum{k in i..nl} (1-u[t,k]-u[t,i-1]+u[t,i])
    else if stat[t]<0 then sum{k in i..nl} (1-u[t,k]+u[t,i])
        else sum{k in i..nl} (-u[t,k]+u[t,i]))>=0;

```

**-corher.dat i combinat.dat:**

```
##### DADES REPORT II - Feb 08 #####
```

```

param nl:=24;
param nT:=8;
param nU:=3;
set U[1]:= 1 2 3;
set U[2]:= 4 5 6 ;
set U[3]:= 7 8;
param L[*]:= 1 200
            2 500
            3 500;
param nScen:=10;
param Prob :=
1 0.0333333
2 0.0566667
3 0.0633333
4 0.0966667
5 0.16
6 0.0566667
7 0.1733333
8 0.11
9 0.126667
10 0.123333
;
param PreuD [*,*]:   1    2    3    4    5    6    7    :=
1 5.09896 5.29509 4.77123 4.79106 5.20551 5.04766 6.09327
2 4.68801 3.98286 4.09469 5.64727 5.47085 6.19393 5.03003

```

3	2.77019	3.00816	2.89922	4.49783	3.93194	4.09206	4.28246
4	2.51259	2.51378	2.57184	3.47087	3.6855	3.36492	2.82418
5	2.47229	2.33253	2.58903	3.29627	3.11714	2.89002	3.24978
6	2.50199	2.48564	2.43421	3.04195	2.82212	2.76229	2.6209
7	2.4687	2.45641	2.32278	3.05461	2.68006	3.08851	3.22472
8	2.62363	2.89403	2.83645	2.9115	3.31631	3.42103	3.60293
9	3.27428	3.26	3.72245	3.77691	3.94701	4.01332	4.09735
10	3.85032	4.25731	3.70724	3.44233	3.39919	4.48208	5.3378
11	4.98307	5.00482	4.81284	5.59575	5.08765	7.97913	7.13708
12	6.51618	5.3202	6.18073	5.42408	5.37085	8.62103	8.18219
13	5.96946	6.14383	5.23446	5.76675	6.29052	7.33291	8.65718
14	6.0421	5.31978	5.92831	5.77421	6.86178	6.42683	7.33889
15	5.17275	5.41755	4.63993	6.10675	4.94089	5.37171	6.64657
16	4.49821	4.94407	4.46578	4.19567	5.05059	5.00206	5.19529
17	4.18563	4.19675	4.69252	4.18839	3.77143	4.81992	5.61593
18	4.93128	5.35828	4.82811	4.56946	4.99575	5.40618	7.01752
19	5.7301	5.70397	5.90792	5.61279	4.58756	8.24601	7.10075
20	8.5098	7.00577	6.89787	7.17067	7.40927	11.6447	11.4451
21	7.91147	8.04166	7.54204	7.07939	8.67414	10.7435	10.2857
22	5.81668	7.17416	5.71774	7.19047	7.03671	7.48472	10.105
23	6.27976	6.61748	5.99274	5.40333	6.1534	8.78969	6.54437
24	5.41715	5.33525	4.54465	5.08776	5.71276	7.11485	7.14541

:	8	9	10	:=
1	7.00951	6.94288	6.29236	
2	6.2441	5.68558	6.12044	
3	4.462	4.50503	3.48676	
4	4.28015	3.90764	3.17507	
5	3.30102	3.45939	3.25179	
6	3.20068	3.06371	2.654	
7	2.84076	2.56599	2.66068	
8	3.32463	2.93081	2.7876	
9	3.37845	3.32116	2.98413	
10	2.90535	2.66736	3.52108	



11 2.52827 2.68074 5.19009  
12 4.60083 4.87843 6.88133  
13 4.58098 4.28768 7.47089  
14 4.10134 4.72171 6.01091  
15 4.45735 5.24197 6.23595  
16 3.60803 3.80971 4.32846  
17 3.883 3.6942 3.70372  
18 3.82746 4.13839 3.52738  
19 4.10808 3.92365 5.44359  
20 5.874 5.95786 7.93312  
21 8.77019 7.51818 9.07593  
22 6.26049 8.03176 7.05235  
23 8.16529 6.27445 5.61969  
24 4.66347 6.19364 5.44688

;

param Coston:=

1 835067.16  
2 880526.98  
3 202382.21  
4 382452.32  
5 838680.86  
6 1317873.70  
7 679546.03  
8 679546.03 ;

param Costoff:=

1 835067.16  
2 880526.98  
3 202382.21  
4 382452.32  
5 838680.86  
6 1317873.70  
7 679546.03  
8 679546.03 ;

param Cb:=

1 192739.563  
2 117180.0136  
3 588437.6111  
4 205342.687  
5 484364.4402  
6 261888.1339  
7 276743.2103  
8 472921.1836

;

param Cl:=

1 5150  
2 5270  
3 5191  
4 14476  
5 3600  
6 5160  
7 13354  
8 7160

;

param Cq:=

1 1.49  
2 3.59  
3 0.00  
4 1  
5 1.96  
6 0.00  
7 0.00  
8 0.00 ;

param Ton default 3;

param Toff default 3;

param stat:=

1 -3  
2 -3

3 -3  
4 -3  
5 -3  
6 -3  
7 -3  
8 -3

;

param Pmin:=

1 160.00  
2 160.00  
3 30.00  
4 60.00  
5 160.00  
6 90.00  
7 110.00  
8 110.00

;

param Pmax:=

1 350.00  
2 370.70  
3 65.00  
4 166.40  
5 364.10  
6 350.00  
7 313.60  
8 313.60 ;

