

# Màster en Enginyeria Matemàtica

---

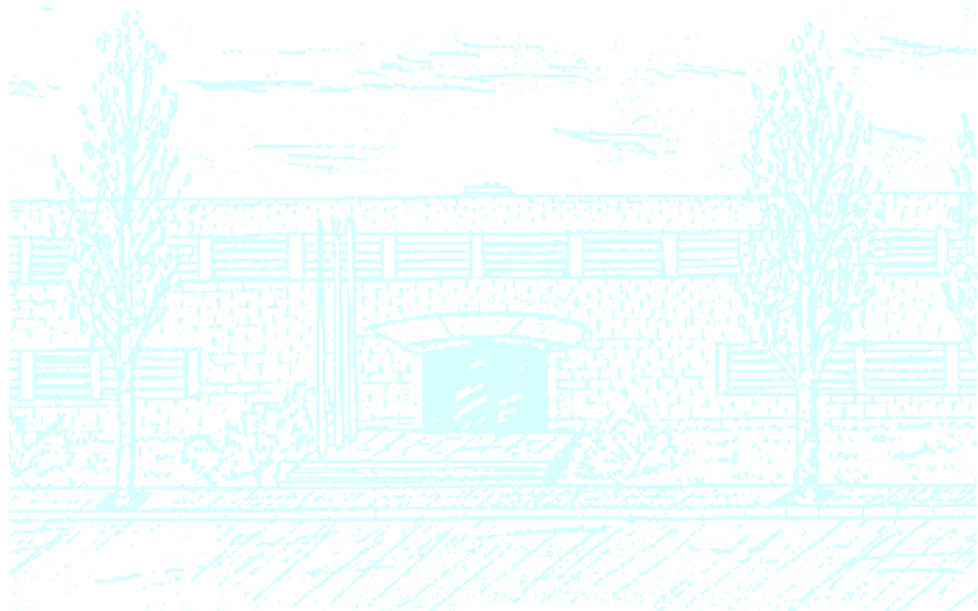
**Títol: Oferta òptima multi – mercat al Mercat Ibèric d'Electricitat.**

**Autor: Eva Romero i Beneyto**

**Director: F.Javier Heredia Cervera**

**Departament: Estadística i Investigació Operativa**

**Convocatòria: gener / 09**



Facultat de Matemàtiques  
i Estadística



UNIVERSITAT POLITÈCNICA  
DE CATALUNYA

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA  
MÀSTER EN ENGINYERIA MATEMÀTICA  
GROUP ON NUMERICAL OPTIMIZATION AND MODELING

# OFERTA ÒPTIMA MULTI-MERCAT AL MERCAT IBÈRIC D'ELECTRICITAT

---

Projecte de Màster

EVA ROMERO BENEYTO

Director: F. Javier Heredia  
Barcelona, Gener 2009



# Índex

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>1</b> | <b>Introducció</b>   | <b>1</b>  |
| 1.1      | Agraïments . . . . .   | 1         |
| 1.2      | Context i motivació . . . . .  | 2         |
| 1.3      | Objectius . . . . .  | 2         |
| 1.4      | Estat de l'art . . . . .   | 3         |
| 1.5      | Software . . . . .   | 4         |
| 1.6      | Organització de la memòria . . . . .                                     | 5         |
| 1.7      | Conceptes preliminars: Funcionament del Mercat Ibèric Elèctric . . . . . | 5         |
| 1.7.1    | Mercat Diari . . . . .   | 6         |
| 1.7.2    | Mercat de Secundària . . . . .   | 8         |
| 1.7.3    | Mercat Intradinari . . . . .   | 10        |
| <b>2</b> | <b>Model d'oferta òptima</b>   | <b>15</b> |
| 2.1      | Model i rèplica en AMPL . . . . .  | 15        |
| 2.2      | Anàlisi de les dades d'entrada . . . . .                                 | 18        |
| 2.3      | Anàlisi de la formulació . . . . .                                       | 20        |
| 2.3.1    | Mercat Diari . . . . .   | 20        |
| 2.3.2    | Mercat de Secundària . . . . .   | 23        |
| 2.3.3    | Mercat Intradinari . . . . .   | 26        |
| 2.3.4    | Formulació compacta . . . . .  | 29        |
| 2.3.5    | Formulació final . . . . .   | 34        |
| 2.4      | Anàlisi dels resultats . . . . .   | 36        |
| 2.4.1    | Anàlisi comparatiu: implementació vs article . . . . .                   | 36        |
| 2.4.2    | Anàlisi computacional i econòmic . . . . .                               | 38        |
| 2.5      | Conclusions i possibles millores . . . . .                               | 41        |

|          |  |            |
|----------|--|------------|
| <b>3</b> | <b>Millora 1: Model continu d'oferta òptima</b>              | <b>43</b>  |
| 3.1      | Plantejament . . . . .                                       | 43         |
| 3.2      | Formulació matemàtica . . . . .                              | 50         |
| 3.2.1    | Funció objectiu . . . . .                                    | 51         |
| 3.2.2    | Constriccions . . . . .                                      | 51         |
| 3.2.3    | Modelització final . . . . .                                 | 57         |
| 3.3      | Anàlisi dels resultats . . . . .                             | 59         |
| 3.3.1    | Anàlisi computacional i econòmic . . . . .                   | 59         |
| 3.3.2    | Anàlisi comparatiu: rèplica vs model millora 1 . . . . .     | 62         |
| 3.4      | Conclusions i possibles millores . . . . .                   | 67         |
| <b>4</b> | <b>Millora 2: Model esglaonat de funció d'oferta</b>         | <b>69</b>  |
| 4.1      | Plantejament . . . . .                                       | 69         |
| 4.2      | Formulació integrada . . . . .                               | 71         |
| 4.2.1    | Funció objectiu . . . . .                                    | 71         |
| 4.2.2    | Constriccions . . . . .                                      | 72         |
| 4.2.3    | Formulació final . . . . .                                   | 79         |
| 4.3      | Formulació separada . . . . .                                | 81         |
| 4.3.1    | Funció objectiu . . . . .                                    | 81         |
| 4.3.2    | Constriccions . . . . .                                      | 82         |
| 4.3.3    | Formulació final . . . . .                                   | 82         |
| 4.4      | Anàlisi dels resultats . . . . .                             | 83         |
| 4.4.1    | Anàlisi computacional i econòmic . . . . .                   | 83         |
| 4.4.2    | Anàlisi comparatiu I: millora1 vs. model millora 2 . . . . . | 86         |
| 4.4.3    | Anàlisi comparatiu II: model integrat vs. separat . . . . .  | 88         |
| 4.5      | Conclusions i possibles millores . . . . .                   | 90         |
| <b>5</b> | <b>Conclusions</b>   | <b>93</b>  |
| <b>A</b> | <b>Annexos</b>   | <b>97</b>  |
| A.1      | Replica article.mod . . . . .                                | 97         |
| A.2      | Millora 1.mod . . . . .                                      | 100        |
| A.3      | Millora 2 integrat.mod . . . . .                             | 103        |
| A.4      | Millora 2 separat.mod . . . . .                              | 106        |
| A.5      | Arxius .dat . . . . .  | 109        |
|          | <b>Bibliografia</b>  | <b>113</b> |

# Capítol 1

## Introducció

Diàriament es duen a terme diversos mercats d'electricitat. Des del punt de vista d'una companyia generadora elèctrica, estudiar quina és la millor oferta a presentar en cada un d'ells pot comportar una millora rellevant en els beneficis obtinguts. Valorar la oferta que es fa en un mercat tenint en compte les possibles ofertes a presentar en els posteriors pot encara avantatjar el primer. Aquest és l'objectiu del que es coneix com a models d'oferta multi - mercat, motivació d'aquest projecte.

Així doncs, el present projecte de màster es centra en la modelització de funcions d'oferta multi - mercat en el context del Mercat Elèctric Ibèric (MIBEL). L'objectiu principal d'aquests models és determinar la funció d'oferta a presentar per part d'una generadora elèctrica.

El present projecte s'ha realitzat dins el grup de recerca GNOM (*Group on Numerical Optimization and Modeling*).

### 1.1 Agraïments

Aquest projecte s'ha pogut dur a terme gràcies als recursos facilitats pel mateix grup de recerca GNOM.

Per altra banda, també cal agrair l'ajuda i col·laboració per part dels autors de l'article en que es basa aquest projecte, els doctors A.J.Conejo, M.A. Plazas *et al.*, els quals ens han facilitat les dades utilitzades així com qualsevol aclariment sobre l'article.

## 1.2 Context i motivació

El mercat elèctric ibèric és un mercat liberalitzat on diàriament es realitzen diferents transaccions d'energia estructurades en diversos mercats. En els mercats elèctrics s'integren bàsicament tres parts: les empreses generadores, l'operador del mercat i les empreses distribuïdores.

Les empreses generadores oferten quantitats d'energia fixant un preu d'acord amb la seva estratègia; les empreses distribuïdores presenten ofertes de compra de certes quantitats d'energia en funció de la demanda estimada a un altre preu; i l'operador del mercat, OMEL, selecciona el conjunt d'ofertes que satisfacin les ofertes de compra presentades amb el menor preu possible, procediment que s'anomena cassació.

L'anàlisi de la oferta de venda a fer en un mercat per part d'una companyia generadora elèctrica té repercussions directes en l'energia que l'operadora li podrà cassar i, per tant, en els beneficis a obtenir.

Així mateix, donat que en un mateix dia es duen a terme diversos mercats, una companyia generadora presenta diverses ofertes. Corresponentment, els beneficis obtinguts procedeixen de tots els mercats en que la companyia participa. La oferta òptima a presentar en un mercat pot dependre de l'energia cassada en mercats anteriors i de l'esperança de guany per mercats posteriors.

Els mercats on es duen la major part del volum de les transaccions econòmiques s'anomenen Mercat Diari i Mercat Intradiari. Un altre mercat important, encara que de característiques molt diferents al anteriors, és el que es coneix com a Mercat de Secundària.

Els models multi - mercat presentats integren els tres mercats citats per tal d'optimitzar la funció d'oferta a realitzar en cadascun d'ells en termes de benefici. Mitjançant aquest tipus de modelitzacions es pretén definir la funció d'oferta del mercat que es porta a terme primer tenint en compte els mercats que es succeiran en posterioritat.

L'estudi, anàlisi i desenvolupament d'aquests tipus de models són el motiu d'aquest projecte.

## 1.3 Objectius

A continuació es descriuen els principals objectius fixats en la proposta d'aquest projecte.

Així doncs, com a objectius preeliminars a adquirir:

- Entendre el funcionament del mercat elèctric ibèric liberalitzat.

- Comprendre el funcionament, la naturalesa i les transaccions que es duen a terme en els principals mercats realitzats diàriament, en particular, el Mercat Diari, el Mercat de Secundària i el Mercat Intradari.

A més a més, els objectius centrals són:

- Analitzar, implementar i criticar el model d'oferta òptim multi-mercat presentat en l'article [11].
- Analitzar, desenvolupar, implementar i resoldre una nova modelització multi-mercat en base l'anterior adaptant el model d'oferta òptima de [8] i realitzar un anàlisi comparatiu.
- Aportar algun possible canvi en funció de les característiques analitzades dels anteriors models i plasmar-lo en una nova modelització que dissenyar, implementar i resoldre completant-lo amb un anàlisi comparatiu.

A més a més, per tal de poder assolir els anteriors, també es proposa

- Assolir els coneixements necessaris del llenguatge `AMPL` i el resolutor `CPLEX` per tal de poder implementar i resoldre correctament els models presentats en el projecte.
- Aprofundir en els coneixements de la modelització en programació matemàtica i iniciar-se en els models de programació estocàstica.

## 1.4 Estat de l'art

En el present projecte s'estudien i analitzen models d'oferta multi-mercat. La integració de més d'un mercat en la mateixa modelització és una qüestió poc tractada en termes generals de la qual se'n troben poques referències.

Tot i així, en [1] es construeix un model d'oferta que integra el Mercat Diari, el Mercat de Secundària i la primera sessió del Mercat Intradari del Mercat Elèctric espanyol. En aquest article es presenta un model estocàstic lineal mixt que optimitza el benefici per a una unitat generadora englobant els tres mercats basat en la predicció de la funció de demanda residual a partir de l'ús d'arbres d'escenaris.

La funció d'oferta es construeix *a posteriori* a partir de l'energia associada a cada escenari, discretitzant aquesta funció amb l'objectiu de complir els requeriments fixats



per MIBEL minimitzant l'àrea restant entre la funció d'oferta esglaonada i la funció lineal.

En [3] també es presenta un model multi - mercat referent al Mercat Diari, de Secundària i Intradari. En aquest article, s'integra el que es coneix com a *unit commitment* a la modelització, és a dir, el fet de que les unitats puguin estar engegades o apagades de manera que puguin o no participar en un mercat. La modelització resultant és un model estocàstic mixt amb constriccions no lineals. Anàlogament a l'article previ, també es crea una arbre d'escenaris per tal d'obtenir les dades pel model.

Un altre article on s'integren els tres principals mercats de MIBEL en la modelització és [11]. En aquest es defineix un model estocàstic lineal mixt que maximitza el guany esperat en el Mercat Diari, en el Mercat de Secundària i el Intradari. La funció d'oferta resultant es construeix a partir dels escenaris construïts i l'energia d'oferta òptima associada a aquests.

Aquest últim article és la base inicial d'aquest projecte, fet pel qual es descriu amb més cura en el capítol següent.

## 1.5 Software

Amb l'objectiu d'implementar els diferents tipus de models d'optimització presentats en el projecte es fa ús del llenguatge AMPL: *A modeling Language For Mathematical Programming*. Aquest està orientat a l'optimització de manera que és un llenguatge comercial de programació molt específic i encarat a la implementació de problemes de investigació operativa, tant problemes lineals, no lineals com de programació entera ([12]).

AMPL és un llenguatge algebraic que resulta força intuïtiu que s'inicià a desenvolupar a mitjans de la dècada dels vuitanta per R.Fourer, D.M. Gay i B.W. Kernighan. Ofereix tot un conjunt de possibilitats d'ús de resolutors que permeten solucionar diferents tipus de modelitzacions de forma flexible.

Mitjançant aquest llenguatge es poden definir, bàsicament, tres tipus d'arxius:

- *.mod*: es descriu el programa algebraicament: conjunts, paràmetres, variables, funció objectiu i constriccions,
- *.dat*: es descriuen les dades dels conjunts i paràmetres a utilitzar en l'execució de l'arxiu *.mod*,
- *.run*: es descriu el model a executar mitjançant l'arxiu *.mod*, les dades a emprar en les execucions amb l'arxiu *.dat*, el resolutor a utilitzar i es defineixen les

especificacions, rutines i opcions per tal de configurar les execucions a realitzar.

Així doncs, segons el problema a resoldre AMPL permet emprar, entre d'altres, diferents resolutors com CPLEX, MINOS, SNOPT o KNITRO entre d'altres. Tal i com es descriu en [13], el *solver* a utilitzar cal que sigui escollit d'acord amb les característiques del model a tractar.

Per tal de resoldre els problemes implementats s'ha utilitzat CPLEX 11.0 el qual permet solucionar flexiblement problemes lineals mixtes o purs amb funció objectiu lineal o quadràtica i ofereix diferents ajustos per tal d'aplicar en els mètodes invocats per la seva resolució ([9]).

En segon pla, en el projecte present com a *software* per tal de tractar i representar dades s'ha emprat Matlab, Excel i Tableaux.

## 1.6 Organització de la memòria

L'estructura de la present memòria consta, bàsicament, de cinc capítols.

EL primer d'ells, el present, introdueix, contextualitza i recull els objectius plantejats per aquest projecte. En últim lloc s'inclou la descripció de les principals característiques del funcionament dels mercats elèctriques que es tracten durant el projecte.

El capítol 2 presenta l'estudi, anàlisi i validació dels resultats obtinguts en la implementació del model presentat en l'article [11].

En el capítol 3 es mostra el plantejament de diversos canvis en l'enfocament d'alguns conceptes, així com el desenvolupament d'aquests en una nova modelització presentada com a primera millora. En aquest s'inclouen els resultats obtinguts realitzant, també, un anàlisi comparatiu respecte l'anterior.

En el capítol 4 es presenta i desenvolupa una nou model com a segona millora proposat segons diferents punts de vista a partir dels quals s'analitzen els resultats obtinguts.

Per acabar s'exposen les conclusions generals que se n'extreuen globalment del projecte.

## 1.7 Conceptes preliminars: Funcionament del Mercat Ibèric Elèctric

A continuació es descriu el funcionament dels tres mercats principals que intervenen en les transaccions diàries d'energia elèctrica: el Mercat Diari, el Mercat de Secundària i el

Mercat Intradiari. Conèixer el funcionament bàsic d'aquests es considera necessari per tal de poder construir els següents capítols.

El procediment i descripció de l'estructura d'aquests mercats es detalla en reglaments com reglaments com [6] i de forma més resumida en algunes pàgines *web* com [16], [14] o [15].

### 1.7.1 Mercat Diari

El Mercat Diari 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 cobro 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, 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

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 càssació (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. En primer lloc, les ofertes simples consten de parells energia-preu per cada període horari, podent definir fins a 10 trams en cada hora de forma creixent.

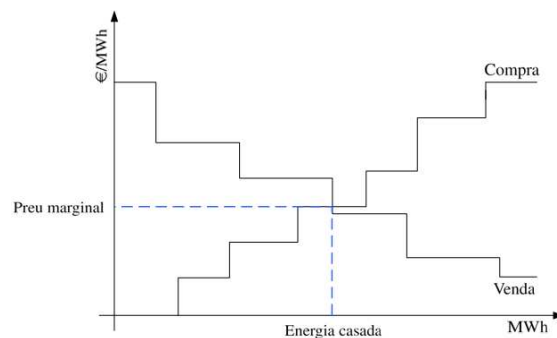


Figura 1.1: Cassació en el Mercat Diari.

En segon lloc, les ofertes complexes es defineixen com aquelles que, complint amb els requisits de les ofertes simples, incorporen, a més a més, qualssevol de les condicions tècniques o econòmiques següents:

- **Condicció d'indivisibilitat:** permet fixar en el primer tram de cada hora un valor mínim de funcionament
- **Gradient de càrrega:** permet establir la diferència màxima entre la potència inicial de hora i potència final de hora de la unitat de producció
- **Condicció d'ingressos mínims:** es respecta la no participació en el resultat de la cassació del dia si no s'obté pel conjunt de la producció del dia un ingrés superior a una quantitat fixa i una remuneració variable establerta per cada kWh cassat.
- **Parada programada:** permet una parada en un temps màxim de tres hores en el cas que la unitat de producció hagi estat retirada de la cassació per no complir amb la condició d'ingressos mínims.

L'operador del mercat realitza la cassació a les 10.00 hores amb totes aquelles ofertes rebudes anteriorment a la hora citada. La cassació serà simple o composta d'acord amb les ofertes que s'hagin presentat. En 1.1 s'observa l'energia cassada d'acord amb les ofertes de compra i venda presentades.

Per una banda, 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 la oferta de venda de la última unitat de producció la cassació de la qual hagi estat necessària per tal d'atendre la demanda.

Per altra banda, el mètode de cassació complexa obté el resultat de la cassació iterant el procediment de cassació simple condicionada. Aquest últim procés es basa en el mètode iteratiu simple afegint les condicions de gradient de càrrega i indivisibilitat. El procés iteratiu finalitza quan la solució obtinguda compleix les condicions d'ingressos mínims i parada programada per a totes les unitats cassades. Tanmateix, la solució obtinguda és la primera solució final provisional, donat que mitjançant un altre procés iteratiu s'obté la primera solució final definitiva limitant la capacitat de les interconnexions internacionals. En aquest últim procés, no només es tenen en compte les ofertes del mercat diari, sinó també les execucions de contractes bilaterals físics que afectin a les interconnexions externes al Mercat Ibèric. A més a més, però, hi ha previst una resolució alternativa pel cas de congestió interna en el Mercat Ibèric basada en la separació de mercats obtenint un preu en cada zona del Mercat Ibèric, sense congestió entre aquests sistemes elèctrics. En aquest últim cas, el preu de la zona exportadora s'establirà com el màxim de les ofertes de venda cassades, i el preu de la zona importadora com el màxim dels preus obtinguts en les dues cassacions corresponents a ambdues zones.

Com a resultat de la cassació, l'operador del mercat obté el resultat de la Cassació, entenent com aquest 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.

### **1.7.2 Mercat de Secundària**

El Mercat de Secundària té per objectiu anular els desviaments respecte els programes d'intercanvi i el manteniment de la freqüència del sistema en el seu valor de referència en base un sistema de Control Automàtic de Generació (AGC).

En el Mercat de Secundària, particularment descrit en [4] es retribueix en dos

conceptes:

- Banda: es retribueix la banda de potència assignada al preu marginal d'aquesta. A partir de la informació rebuda procedent de l'operador del sistema de la banda assignada es calculen els drets de cobro i les obligacions de pagament associades. Les obligacions de pagament corresponent a distribuïdors, comercialitzadors, consumidors qualificats, agents externs i titulars d'unitats de producció no inclosos en la zona de regulació.
- Energia: es retribueix l'energia de regulació generada com a resposta a les sol·licituds del sistema al preu de l'energia de regulació terciària.

La presentació de les ofertes per les unitats de generació habilitades constaran d'ofertes de banda de potència de regulació Secundària, en MW, amb el seu preu corresponent, en €/MW, per cada un dels períodes de programació del dia següent. Cada oferta ha de constar de la informació següent:

- Número de la oferta
- Oferta de reserva a pujar  $RNS_{subirh}(MW)$
- Oferta de reserva a baixar  $RNS_{baixarh}(MW)$
- Preu de la banda de regulació  $PS_{bandah}(\text{€/MW})$
- Variació d'energia necessària respecte del programa PVP,  $VEP_h(\pm MWh)$
- Codi de indivisibilitat de la oferta

La suma de la reserva a pujar i baixar d'una oferta ( $RNS_{subirh}(MW) + RNS_{baixarh}(MW)$ ) complirà amb els límits màxim i mínim comunicats per l'Operador del Sistema ( $RSBAN_{max}(MW) + RSBAN_{min}(MW)$ ).

El procediment de cassació que s'estableix en aquest mercat no funciona anàlogament als anteriors. Tal i com s'explicita en [4], a partir dels blocs presentats que compleixen els requeriments exigits es crea una llista ordenada per cost per a cada període de programació. Iterativament, es porta a terme l'assignació d'energia d'acord amb les prioritats que marca la llista ordenada, truncant els blocs presentats en cas de no mantenir la relació entre la reserva a pujar i a baixar establerta, reservant l'energia truncada per iteracions posteriors. El procés finalitza quan el valor d'energia assignada a pujar i a baixar es troba al voltant d'un 10% del valor de la reserva de regulació Secundària establerta com a requeriment.

### 1.7.3 Mercat Intradiari

El Mercat Intradiari té per objectiu atendre els ajustos necessaris sobre el Programa Diari Viable Definitiu com a part integrant del mercat de producció d'energia elèctrica, mitjançant la presentació d'ofertes de venda i adquisició d'aquesta energia.

En aquest mercat consten diverses sessions de contractació amb horitzons de programació diferents per cada una d'aquestes tal i com es descriu en [5]. Cada sessió, però, està equilibrada en energia, és a dir, l'energia venuda és igual a la comprada i, en conseqüència, els drets de cobrament dels venedors són les obligacions de pagament dels compradors. Anàlogament al Mercat Diari, cada sessió té un únic preu per compradors i venedors, el preu marginal de la sessió. Tanmateix, i a diferència d'aquest últim, per una mateixa hora hi hauran tants preus com sessions del Mercat Intradiari es portin a terme. A més a més, per cada unitat de producció o adquisició es podran presentar múltiples ofertes de compra o de venda.

Actualment, el Mercat Intradiari s'estructura en sis sessions amb la distribució horària mostrada a la taula 1.1 (horaris límits possibles).

| SESSIONS MERCAT INTRADIARI |          |          |          |          |          |          |
|----------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| ACTIVITAT                  | Sessió 1 | Sessió 2 | Sessió 3 | Sessió 4 | Sessió 5 | Sessió 6 |
| Obertura                   | 16:00    | 21:00    | 01:00    | 04:00    | 08:00    | 12:00    |
| Clausura                   | 17:45    | 21:45    | 01:45    | 04:45    | 08:45    | 12:45    |
| Cassació                   | 18:30    | 22:30    | 02:30    | 05:30    | 09:30    | 13:35    |
| Desagregats                | 19:00    | 23:00    | 02:45    | 05:45    | 09:45    | 13:45    |
| An. Restriccions           | 19:10    | 23:10    | 03:10    | 06:10    | 10:10    | 14:10    |
| An. Restriccions           | 19:20    | 23:20    | 03:20    | 06:20    | 10:20    | 14:20    |
| H. Programació             | 28h      | 24h      | 20h      | 17h      | 13h      | 9h       |

Taula 1.1: Sessions de Mercat Intradiari

Cada unitat de producció o de compra podrà presentar múltiples ofertes de compra o de venda.

Les ofertes de venda d'energia elèctrica es podran presentar, fonamentalment, per part de tots aquells agents habilitats per presentar ofertes en el Mercat Diari i que hagin participat en la sessió del Mercat Diari corresponent o executat algun contracte bilateral. Els agents que compleixin les condicions mencionades podran participar al Mercat Intradiari en els períodes horaris de programació que es corresponent amb els inclosos en la sessió del Mercat Diari en la qual hagin participat.

Així mateix, i a reflex del Mercat diari, les ofertes de venda d'energia elèctrica que el venedors del Mercat Intradiari presenten a l'operador del mercat poden ser simples o incloure condicions complexes a raó del seu contingut.

En primer lloc, les ofertes simples són ofertes econòmiques de venda d'energia de 1 a 5 trams que els venedors presenten per cada període horari i unitat de venda o compra de la qual siguin titulars. Aquestes ofertes simples expressen un preu i una quantitat d'energia, sent el preu creixent en cada tram.

En segons lloc, les ofertes de venda que inclouen condicions complexes són aquelles que, complint amb els requisits mínims exigits per les ofertes simples, incorporen totes, alguna o algunes de les següents condicions:

- Gradient de càrrega: anàloga al Mercat Diari.
- Ingressos mínims: anàloga al Mercat Diari.
- Acceptació completa en la cassació del primer tram de les ofertes de venda: permet crear un perfil pel conjunt de totes les hores del Mercat Intradiari que només pot resultar cassat en cas de ser-ho el primer tram de totes les hores. Aquesta condició s'acostuma a utilitzar quan la programació d'unes hores només és possible si també es modifiquen d'altres, fet que pot ser degut al programa de parades o arrancades,...
- Acceptació completa en cada hora en la cassació del primer tram de la oferta de venda: en una hora determinada només serà programat el primer tram en cas de ser cassat en tota la seva totalitat, retirant-se tots els trams d'aquesta oferta i no sent retirada la oferta realitzada per la resta d'hores. Aquesta opció és especialment útil per la programació de grups que produeixen o consumeixen un valor mínim o res (restricció de mínim tècnic).
- Condició de mínim número d'hores consecutives d'acceptació completa del primer tram de la oferta de venda: es fixen un número d'hores consecutives d'acceptació per tal de permetre a les unitats de producció o compra produir o deixar de consumir de forma consecutiva almenys un número determinat d'hores



mínim consentint així la possibilitat de fixar un mínim d'hores en funcionament de les unitats.

- Energia màxima: es fixa un valor d'energia màxima cassada per la totalitat de les hores amb l'objectiu de permetre ofertar en totes les hores a unitats que tinguin una limitació en la disponibilitat d'energia. Aquesta condició es fa més necessària en aquest mercat donada la volatilitat dels preus del Mercat Intradiari.

Així doncs, les ofertes de venda per a cada sessió del Mercat Intradiari són tals que el programa final resultant de l'acceptació completa de la oferta conjuntament amb el programa previ de la unitat de venda o de compra respecti les limitacions declarades pels operadors del sistema per l'horitzó de programació.

Anàlogament a les ofertes de compra, bàsicament les ofertes de venda poden ser presentades per tots aquells agents habilitats en el Mercat Diari i que han participat en la sessió corresponent d'aquest o executat un contracte bilateral. Aquests agents només podran participar en aquells períodes horaris de programació que es corresponguin amb aquells pels quals hagin estat inclosos en el Mercat Diari.

Igualment, les ofertes de venda poden ser simples o compostes. Pel primer cas, es tracten d'ofertes econòmiques de compra d'energia per cada període horari de programació i unitat de producció o adquisició de la qual siguin titulars amb l'expressió d'un preu i una quantitat d'energia. Pel segon cas, les ofertes complexes de compra són aquelles que, a més a més de complir els requeriments de les simples, incorporen una o més d'una de les condicions següents anàlogues a les ja citades en les ofertes de venda:

- Gradient de càrrega
- Pagament màxim
- Acceptació completa en la cassació del primer tram de les ofertes de compra
- Acceptació completa en cada hora en la cassació del primer tram de la oferta de compra
- Condició de mínim número d'hores consecutives d'acceptació completa del primer tram de la oferta de compra
- Energia màxima.

La cassació de les ofertes de compra i venda de l'operador del mercat d'energia elèctrica es duen a terme mitjançant el mètode de cassació simple o complexa, d'acord amb les ofertes presentades.

El procés de cassació i l'establiment del preu per cada període horari de programació és anàleg al procés seguit i descrit en el Mercat Diari.



## Capítol 2

# Model d'oferta òptima

En aquest capítol es descriu l'anàlisi exhaustiu del model d'oferta òptima multimercat per a una unitat generadora amb referència [11], així com la comprensió, la rèplica i la resolució obtinguda a partir d'aquest.

### 2.1 Model i rèplica en AMPL

La modelització d'un problema comporta dissenyar, idear i esbossar com s'entenen cada un dels factors integrants del model, així com definir les pròpies limitacions d'aquest: el que es vol englobar i el que es vol deixar al marge. Un model d'oferta òptima també, així que, a continuació, es descriuen consideracions, conceptes i idees que, prèviament a submergir-se en les particularitats de la pròpia modelització, es considera important de tenir en compte.

El model d'oferta òptima presentat en l'article citat [11] és un model multimercat, és a dir, engloba més d'un mercat d'intercanvi d'energia elèctrica en la definició de la funció d'oferta òptima estimada i, per tant, la determinació de la proposta formada per parells preu-potència per un primer mercat és una decisió presa tenint en compte els possibles mercats posteriors.

El fet de prendre aquest enfocament en la modelització permet ajustar el guany d'un primer mercat, mitjançant la pertinent oferta, a partir del que possiblement es pot obtenir en els posteriors mercats integrants de la modelització. Fixant l'horitzó en un marc de benefici global, aquest no seria resposta de sumar el màxim profit de cada mercat calculat independentment: els recursos i l'energia que pot ofertar cada generadora en un cert interval horari són, òbviament, finits, de manera que, la reserva d'energia ofertada en un

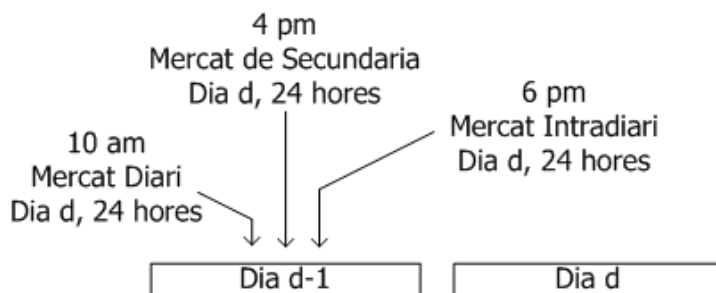


Figura 2.1: Seqüència temporal mercats d'energia elèctrica

mercat tenint en compte el possible benefici en un següent mercat, pot permetre obtenir majors guanys.

Així doncs, la funció d'oferta obtinguda en l'article mencionat és resultat de la integració de més d'un mercat en la seva pròpia modelització. Els mercats inclosos en el mercat ibèric elèctric que s'han integrat en el model proposat són el mercat diari, el mercat intradiari (la primera sessió) i el mercat de secundària.

En el primer es porta a terme la major part de les transaccions elèctriques, tant a nivell de volum energètic com econòmic. El Mercat Diari és el mercat principal, la participació del qual en depèn la possibilitat de presentar ofertes energia-preu en d'altres mercats posteriors.

El segon, el Mercat Intradiari, consta de sis sessions anàlogues respecte la forma d'operar en cada una d'elles. Sent, així, equivalent la naturalesa de cada una de les sis sessions consecutives, cal mencionar que la més important a nivell de volum negociat és la primera. Aquest és el motiu pel qual en el model només es considera la primera sessió, no sent una aportació significativa el fet de considerar les sessions restants.

En últim lloc, però, es considera el Mercat de Secundària, el qual no es caracteritza per formar part del gruix més important en la negociació del mercat. El motiu de la seva integració és, doncs, diferent: es tracta d'un mercat de naturalesa distinta. Per una banda, el procés de cassació i la funció d'oferta no es defineixen equivalentment als dos mercats anteriors i, per altra, es caracteritza per la volatilitat en el preu i el fet que la pròpia oferta no aporti cost a la unitat de generació, motiu pel qual, tot i que el volum de les transaccions econòmiques que s'hi duen a terme no es pugui considerar gran, sí que és rellevant el guany en les oportunitats que s'hi creen.

Els tres mercats citats es donen diàriament per tal de realitzar la cassació sobre les ofertes i demandes del dia següent tal i com es mostra en la figura 2.1.

El punt de vista a partir del qual s'ha abordat la modelització dels mercats integrants

no és igual en tots tres. Per una banda, es considera que la companyia elèctrica no té capacitat de producció suficient per tal d'inferir en el preu de l'energia mitjançant la seva pròpia oferta en el Mercat Diari i en el de Secundària, per tant, en aquests dos mercats elèctrics l'oferta es modelitza tot tractant a la companyia elèctrica com a *price-taker*. Per altra banda, i a diferència d'aquests dos mercats, en el Mercat Intradiari sí que cal considerar la capacitat d'alterar el preu de l'energia del mercat d'una pròpia generadora, és a dir, es modelitza aquest mercat d'acord amb la idea que el preu d'aquest serà funció de l'energia ofertada per la mateixa unitat: *price-maker*.

Seguidament, doncs, cal analitzar la metodologia emprada per tal d'estimar l'estratègia òptima: mitjançant la programació estocàstica es generen arbres d'escenaris a partir dels quals es simulen els preus del Mercat Diari, el Mercat Intradiari i els coeficients amb els quals es calcularan els preus del Mercat de Secundària a partir de dades històriques.

Anàlogament, un altre fet a analitzar és com s'aborda la participació de les unitats en cada mercat. En el model proposat, la participació en el Mercat Diari es considera una dada inicial, és a dir, una informació coneguda prèviament, de manera que si una unitat forma part en l'execució del model, aquesta participa en el Mercat Diari. Per tant, no es tenen en compte decisions de posada en marxa o apagada de les unitats. En conseqüència, la participació en el Mercat Intradiari també es dona com a vàlida. Legalment només es pot participar en una sessió del Mercat Intradiari per un interval horari si es participa activament en aquell interval horari en el Mercat Diari. Així doncs, donat que es considera que totes les unitats generadores que es tenen en compte en el model participen en el Mercat Diari, també poden participar en l'Intradiari. El model definirà l'estratègia òptima, doncs, considerant la possibilitat de participar també en aquest mercat. La participació en el Mercat de Secundària és factible sempre i quan la fluctuació en energia que s'ofereix està acord amb l'energia cassada en la resta de mercats i les pròpies restriccions tècniques de cada unitat. És a dir, es podrà participar en el Mercat de Secundària si s'ha participat en els altres mercats i l'energia cassada en aquests, respecte la capacitat mínima i màxima de la companyia, permeten encara un marge d'energia sobre el qual poder construir l'oferta. Per tant, i a diferència del Mercat Intradiari, en el de Secundària es considera possible la participació si l'energia cassada en la resta de mercats ho permet, és a dir, en el model es considera la opció de participar en aquest mercat sempre i quan sigui factible la oferta considerant el conjunt.

Així mateix, un altre fet a analitzar és el concepte de màxim benefici d'una unitat. Deixant de banda el que com a propi benefici això signifiqui, cal esmentar que el concepte i la naturalesa de funcionament del propi Mercat Ibèric i, per tant, també dels processos de cassació que s'hi duen a terme, amb tots els seus components, porta a idear

el pensament que el major guany individual s'obté quan també es maximitza el guany de la resta d'unitats. Aleshores, el fet de maximitzar el benefici com a objectiu per tal de trobar les funcions d'oferta es defineix com a sumatori del benefici de totes les unitats, és a dir, la finalitat és optimitzar el benefici global per tal d'obtenir el màxim individual.

En conclusió, doncs, el model que es presenta cerca l'estratègia òptima d'oferta en el Mercat Diari tot considerant els possibles guanys en mercats posteriors, tenint en compte particularitats i punts de vista diferents en cada mercat per tal de ser més fidels a la pròpia condició d'aquests.

## 2.2 Anàlisi de les dades d'entrada

Tractant amb problemes estocàstics on apareixen variables d'incertesa en les dades d'aquest, construir una mostra adequada i representativa enlloc de treballar directament amb les distribucions que les representen permet simplificar-ne la computació. Sota la premissa anterior, en el present projecte es fa ús del que s'anomenen arbres d'escenaris.

Mitjançant els arbres es representa gràficament la jerarquia de les dades que es tracten. Així doncs, en els arbres apareixen tot de nodes connectats uns als altres només per una aresta, excepte el node arrel, el qual està connectat a diferents nodes que s'anomenaran fills. Consecutivament, de cada node es pot connectar, mitjançant una branca, un altre node. Finalment, apareixeran els nodes que no tindran fills, que s'anomenaran fulles.

Un escenari es pot entendre com la possible evolució d'un sistema cap a un estat futur. Aquest escenari mostrarà la hipotètica situació de cada variable que constitueix el sistema per cada període d'un determinat horitzó de planificació. El node arrel s'entén com el moment actual, és a dir, es determina amb les dades que es disposen. Els nodes fills d'aquest representen les decisions posteriors que s'han de prendre en funció del primer node, formaran el primer nivell, i els fills d'aquests representaran les decisions a prendre d'acord amb les primeres decisions definides, definiran el segon nivell i així consecutivament.

Un escenari, doncs, es defineix per una realització concreta del conjunt de variables aleatòries del model dins l'arbre per arribar a la fulla corresponent, és a dir, el conjunt de nodes que uneixen el node arrel fins la fulla pertinent. A cada escenari doncs, li correspondrà una certa probabilitat de ocurrència. En la figura 2.2 es representa un arbre on cada escenari consta de quatre nodes: el node arrel i tres més.

Els models multi-mercat que es tracten en aquest projecte integren el Mercat Diari, el Mercat de Secundària i el Mercat Intradiari. Els arbres d'escenaris que determinaran

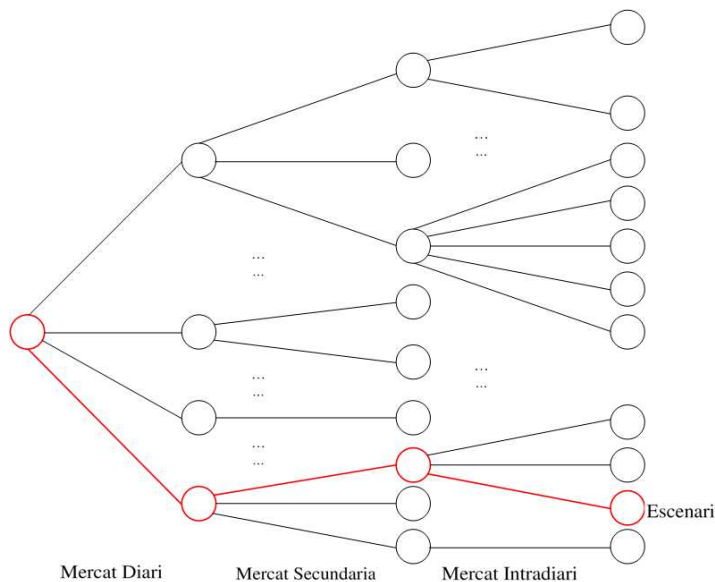


Figura 2.2: Arbre d'escenaris.

el possible univers de decisions estaran definits amb tres nivells, el nodes dels quals representaran el preu de cassació del mercat. El primer nivell representarà la decisió del preu cassat del Mercat Diari, el segon nivell el Mercat de Secundària i, en últim lloc, el tercer nivell, l'Intradiari. Per tant, en cada nivell es perdrà una variable d'incertesa fins arribar a les fulles i obtenir l'escenari compost pels preus que s'hauran realitzat per cada mercat. Així doncs, els preus de cassació de cada mercat correspondran a les variables aleatòries a partir de les quals es construeixen els arbres d'escenaris.

Tanmateix, es defineix un tipus d'arbre on a partir de realitzar els possibles esdeveniments en el primer nivell, la resta de decisions estan determinades. Aquests tipus d'arbres s'anomenen *fans* i es caracteritzen per tenir una estructura fixa a partir de la qual el nombre d'escenaris possibles són el nombre de possibles realitzacions de la variable aleatòria al primer nivell. En la figura 2.3 es representa l'estructura d'aquest tipus d'arbres.

Els arbres d'escenaris dels preus de cassació pels tres mercats integrats en els diversos models utilitzats en aquest projecte tenen l'estructura d'arbres *fan*. En col·laboració amb els autors de l'article [11], els arbres emprats en el present projecte són els utilitzats i construïts en l'article citat. Fruits d'un procés de reducció d'escenaris, els arbres resultants es componen de vint-i-cinc escenaris per cada una de les vint-i-quatre



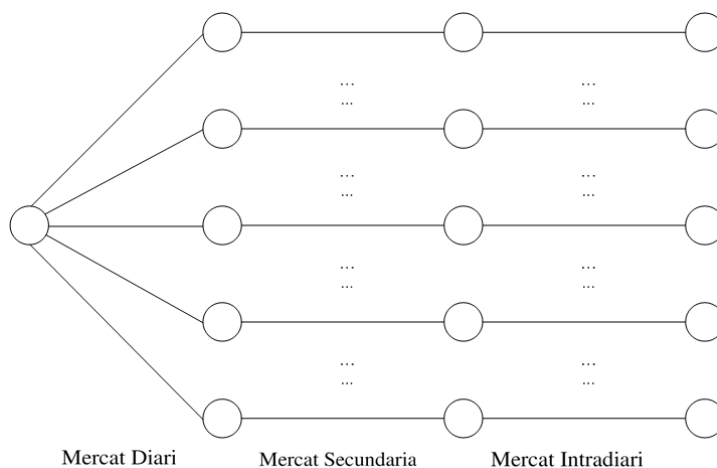


Figura 2.3: Arbre d'escenaris fan.

hores en la que s'executa cada mercat.

Els arbres d'escenaris emprats estan construïts a partir dels preus de cassació de la setmana del 7 al 11 de juny de l'any 2.004.

## 2.3 Anàlisi de la formulació

El funcionament, les característiques i les condicions de cada mercat són diferents, així doncs, la seva formulació també. Per tal de facilitar la comprensió de la formulació matemàtica de cada un d'ells, en primer terme aquests són descrits per separat i, en últim lloc, es presenta i analitza la formulació conjunta.

### 2.3.1 Mercat Diari

La formulació estocàstica de l'estratègia d'oferta òptima del Mercat Diari expressa la seva funció objectiu com

$$\max_{p_{i,t}^{D,s}, q_{i,t}^{D,s}, t_i^{D,s}} \mathbf{E}_S \left\{ \sum_{i \in I} (\lambda_i^{D,s} t_i^{D,s} - \sum_{t \in T} C_t q_{i,t}^{D,s}) + \mathbf{E}_{S \setminus \lambda_i^{D,s}} \{ \Psi_s^A(p_{i,t}^{D,s}, q_{i,t}^{D,s}, t_i^{D,s}) \} \right\} \quad (2.1)$$

on:

- $p_{i,t}^{D,s}$  és la variable que indica la potència de la unitat  $t$  en la hora  $i$  i escenari  $s$  del Mercat Diari ( $MW$ ),
- $q_{i,t}^{D,s}$  és la variable que indica l'energia produïda en la unitat  $t$  en la hora  $i$  i escenari  $s$  del Mercat Diari ( $MWh$ ),
- $t_i^{D,s}$  és la variable que indica el total de l'energia produïda per totes les unitats en la hora  $i$  i escenari  $s$  del Mercat Diari ( $MWh$ ),
- $\lambda_i^{D,s}$  és el paràmetre que indica el preu en la hora  $i$  i escenari  $s$  del Mercat Diari ( $\text{€}/MWh$ ),
- $C_t$  és el paràmetre que indica el cost de producció de la unitat  $t$  ( $\text{€}/MWh$ ),
- $S$  és el conjunt d'escenaris,
- $I$  és el conjunt de possibles intervals horaris,
- $T$  és el conjunt d'unitats generadores,
- $\psi_s^A$  és la funció de recurs associada al Mercat de Secundària i l'escenari  $s$ .

Així doncs, expressem el benefici òptim com el màxim de l'esperança per tots els escenaris de la diferència entre els beneficis  $t_i^{D,s} \lambda_i^{D,s}$  i els costos  $C_t q_{i,t}^{D,s}$  de cada hora, conjuntament amb l'esperança sobre els escenaris factibles un cop fixat l'escenari del preu del Mercat Diari de la funció de recurs del Mercat de Secundària. La citada funció de recurs es calcula mitjançant el model que es presenta en el següent apartat referent al Mercat de Secundària.

Seguidament, doncs, serà necessari descriure les constriccions fixades.

$$q_{i,t}^{D,s} = \frac{1}{2}(p_{(i-1),t}^{D,s} + p_{i,t}^{D,s}) \quad \forall i \in I, \forall t \in T, \forall s \in S \quad (2.2)$$

$$t_i^{D,s} = \sum_{t \in T} q_{i,t}^{D,s} \quad \forall i \in I, \forall s \in S \quad (2.3)$$

$$q_{i,t}^{D,s} - q_{i,t}^{D,s'} \leq 0 \quad \forall s, s' \in S | (O(\lambda_i^{D,s}) + 1 = O(\lambda_i^{D,s'})), \forall i \in I, \forall t \in T \quad (2.4)$$

$$p_{i,t}^{D,s} = p_{i,t}^{D,s'} \quad \forall s, s' \in S | (\lambda_i^{D,s} = \lambda_i^{D,s'} \forall i \in I), \forall t \in T \quad (2.5)$$

on:

- $O(\cdot)$  és la funció que expressa el límit,
- $I$  és el conjunt de possibles intervals horaris,
- $T$  és el conjunt d'unitats generadores,
- $S$  és el conjunt d'escenaris.

Com es pot observar, la primera constricció fixa l'energia per cada escenari, cada unitat i cada interval horari com la mitjana del valor que pren la potència en aquella hora i l'anterior en aquell escenari i unitat:

$$q_t = \frac{P_{i,t}^{D,s} + P_{(i-1),t}^{D,s}}{2} \quad (2.6)$$

entenent la potència com el valor que prendrà al final d'aquella hora en concret.

En segon lloc, en les constriccions fixades s'observa com s'igualava el valor de la variable  $t_i^{D,s}$  amb la suma de l'energia entregada per totes les unitats en aquella hora i escenari. Aquesta equació (2.3) és motivada per la pròpia definició de la variable  $t_i^{D,s}$ .

Seguidament, s'observa la constricció (2.4) on es fixa que el valor de l'energia de la mateixa unitat en la mateixa hora, però en escenaris diferents, sigui coherent amb el valor del preu d'aquests escenaris. El motiu pel qual es demana que si el preu d'un escenari és major que el d'un altre, l'energia corresponent del primer també sigui major a la del segon és la corba d'oferta que es vol derivar a partir del valor que prenguin les variables d'energia de tots els escenaris. Així doncs, el model que s'està descrivint construeix la corba d'oferta òptima en base als parells de valors preu-energia, preu marcat per cada escenari i energia obtinguda mitjançant la resolució del model. D'aquesta manera, per tal que la corba d'oferta resultant es pugui considerar com a tal, és necessari que sigui creixent pels propis condicionants del Mercat Ibèric

En últim lloc, es pot estudiar la constricció de no-anticipació (2.5), és a dir, la imposició que per aquells escenaris que fixin el mateix preu en el Mercat Diari el valor de la potència obtinguda sigui el mateix. Així doncs, la condició de no-anticipació ([10]) imposa que el valor òptim de les variables de cada etapa de l'optimització es fixi considerant només la informació estocàstica disponible en aquella etapa, i no en les posteriors. Per tant, no es permet tenir en compte el que passarà en el futur, per modificar les decisions del present: no es poden considerar el valor dels escenaris simulats pel Mercat de Secundària i l'Intradiari per tal de decidir la potència del Mercat Diari, és a dir, només es pot considerar el nivell de nusos de l'arbre d'escenaris corresponent al primer mercat, no es poden tenir en compte els nusos següents.

Per tant, amb les 4 constriccions mencionades s'imposa el correcte funcionament del model pel Mercat Diari. Tot i així, i tal i com es volia reflectir per valorar el guany globalment respecte tots els mercats, la funció objectiu d'aquest té en compte l'esperança del profit en els mercats posteriors respecte els escenaris que es donen en el Mercat Diari, benefici que es calcula amb el model que s'exposa en el següent apartat.

### 2.3.2 Mercat de Secundària

La formulació estocàstica de l'estratègia d'oferta òptima del Mercat de Secundària expressa la seva funció objectiu com

$$\max_{p_{i,t}^{A,s}, q_{i,t}^{A,s}, t_i^{A,s}, on_{i,t}^s} \sum_{i \in I} (\lambda_i^{A,s} t_i^{A,s}) + \mathbf{E}_{S \setminus (\lambda_i^{D,s}, \lambda_i^{A,s})} \{ \Psi_S^B(p_{i,t}^{D,s}, q_{i,t}^{D,s}, t_i^{D,s}, p_{i,t}^{A,s}, q_{i,t}^{A,s}, t_i^{A,s}, on_{i,t}^s) \} \quad (2.7)$$

on:

- $p_{i,t}^{A,s}$  és la variable que indica la potència de la unitat  $t$  en la hora  $i$  i escenari  $s$  del Mercat de Secundària ( $MW$ ),
- $q_{i,t}^{A,s}$  és la variable que indica l'energia produïda en la unitat  $t$  en la hora  $i$  i escenari  $s$  del Mercat de Secundària ( $MWh$ ),
- $on_{i,t}^s$  la variable que val 1 si la unitat  $t$  en la hora  $i$  i escenari  $s$  està engegada en el Mercat de Secundària i 0 en cas contrari,
- $t_i^{A,s}$  és la variable que indica el total de l'energia a fluctuar per totes les unitats en la hora  $i$  i escenari  $s$  del Mercat de Secundària ( $MWh$ ),
- $\lambda_i^{A,s}$  és el paràmetre que indica el preu en la hora  $i$  i escenari  $s$  del Mercat de Secundària ( $\text{€}/MWh$ ),
- $S$  és el conjunt d'escenaris,
- $I$  és el conjunt de possibles intervals horaris,
- $T$  és el conjunt d'unitats generadores,
- $\Psi_S^B$  és la funció de recurs associada al Mercat Intradiari i l'escenari  $s$ .

Així doncs, expressem el benefici òptim com el màxim de l'esperança per tots els escenaris dels beneficis  $\lambda_i^{A,s} t_i^{A,s}$  de cada hora, conjuntament amb l'esperança de guany sobre els escenaris factibles del mercat Intradiari un cop fixat l'escenari del preu del Mercat Diari i de Secundària. L'esperança d'aquest guany s'estima mitjançant la funció de recurs, la qual es calcula mitjançant el model que es presenta en el següent apartat referent al Mercat Intradiari, amb la qual es completa la visió global de maximitzar els beneficis de tots tres mercats. Cal fer esment sobre l'absència d'un factor que determini el cost de producció en la funció objectiu presentada: tal i com la condició d'aquests mercats determina, es retribueix la capacitat de fluctuació respecte l'energia assignada pels altres mercats, és a dir, no es fa referència a energia a produir. Així mateix, cal remarcar que en aquest cas on  $p_{i,t}^{A,s}$  és la potència que s'ofereix a fluctuar, es considera com a variació positiva o d'augment  $\frac{1}{2}p_{i,t}^{A,s}$  i de decreixement  $\frac{1}{2}p_{i,t}^{A,s}$ .

Seguidament, doncs, serà necessari descriure les constriccions fixades.

$$q_{i,t}^{A,s} = \frac{1}{2}(p_{i,(t-1)}^{A,s} + p_{i,t}^{A,s}) \quad \forall i \in I, \forall t \in T, \forall s \in S \quad (2.8)$$

$$t_i^{A,s} = \sum_{t \in T} q_{i,t}^{A,s} \quad \forall i \in I, \forall s \in S \quad (2.9)$$

$$q_{i,t}^{A,s} \leq on_{i,t}^s P_t^A \quad \forall i \in I, \forall t \in T, \forall s \in S \quad (2.10)$$

$$p_{i,t}^{A,s} = p_{i,t}^{A,s'} \quad \forall s, s' \in S | ((\lambda_i^{D,s}, \lambda_i^{A,s}) = (\lambda_i^{D,s'}, \lambda_i^{A,s'}) \forall i \in I), \forall t \in T \quad (2.11)$$

$$on_{i,t}^s \in \{0, 1\} \quad \forall i \in I, \forall t \in T, \forall s \in S \quad (2.12)$$

on:

- $P_t^A$  és el paràmetre que indica la potència màxima de cada unitat  $t$  al Mercat de Secundària (AGC),
- $I$  és el conjunt de possibles intervals horaris,
- $T$  és el conjunt d'unitats generadores, i
- $S$  és el conjunt d'escenaris.

Per aquest mercat s'observa com la primera de les constriccions (2.5) és anàloga a la que s'havia analitzat en el Mercat Diari (2.2), és a dir, l'expressió de l'energia d'una hora com a la mitjana de la potència considerada a la finalització d'aquella mateixa hora i de l'anterior. Tot i així, en aquest mercat, l'energia no ha de ser entesa com a tal,

equivalentment a la definició del Mercat Diari, sinó com a la capacitat de fluctuar sobre l'energia que sigui cassada en altres mercats. D'aquesta manera, obtenir una energia  $x$  en un hora en aquest mercat, conceptualment equivaldrà a oferir la capacitat d'augmentar o disminuir  $\frac{x}{2}$  respecte l'energia ja assignada.

A continuació es fixa una constricció anàloga a la (2.3) que apareix en el Mercat Diari. Per la pròpia definició de la variable  $t_i^{A,s}$ , aquesta s'igual a al valor resultant del sumatori de l'energia atorgat a aquest mercat en totes les unitats per cada interval horari.

En tercer lloc, s'imposa la constricció (2.10) que no té cap correspondència amb les presentades en el Mercat Diari. O bé es limita l'energia del Mercat de Secundària a la potència màxima atribuïda a aquest mercat per cada unitat, o bé s'anul·la aquesta energia en el cas que es consideri que la unitat no participa en aquest mercat.

Seguidament, es troba una constricció essencialment equivalent a la constricció de no-anticipació analitzada en el Mercat Diari (2.4). Tanmateix, en aquest cas aquesta constricció no fixa el present en els escenaris propis del Mercat Diari, sinó que el fixa en els escenaris definits sobre el Mercat de Secundària, és a dir, al que equivaldria als nusos següents de les branques de l'arbre d'escenaris. Tot i així, l'estructura dels arbres d'escenaris són *fan*, la consideració o no de la constricció de no-anticipació pels escenaris del Mercat de Secundària no afecta als resultats.

Finalment, en (2.12) es declara el valor de les variables  $w_{i,t}^s$  corresponentment al fet que siguin definides com a binàries.

Cal tenir en compte, tal i com es presenta en el següent apartat, que les variables  $p_{i,t}^{A,s}$  i  $p_{i,t}^{D,s}$  estan acoblades coherentment amb les limitacions de producció de potència que presenten les companyies elèctriques.

Així doncs, tot i que aparentment només les constriccions que reflecteixen el fet que una unitat pugui no participar en el Mercat de Secundària difereixen del model presentat pel Mercat Diari, conceptualment les variables que defineixen l'energia en cada unitat horària també s'entenen i es defineixen de forma distinta. Coherentment, en la funció objectiu presentada no intervé cap factor de cost de producció d'acord amb el concepte del propi mercat. Tot i així, i a reflex del Mercat Diari, en la funció objectiu sí que es considera un factor d'esperança de guany sobre els escenaris del Mercat Intradiari, el valor del qual s'obtindrà mitjançant el model que s'explica a continuació, que permet acabar d'enllaçar el guany d'un mercat en dependència dels següents.

### 2.3.3 Mercat Intradiari

La formulació estocàstica de l'estratègia d'oferta òptima del Mercat Intradiari expressa la seva funció objectiu com

$$\max_{t_i^{B,s}} \sum_{i \in I} (g_i^{B,s} - \sum_{t \in T} C_t q_{i,t}^{B,s}) \quad (2.13)$$

on:

- $p_{i,t}^{B,s}$  és la variable que indica la potència de la unitat  $t$  en la hora  $i$  i escenari  $s$  del Mercat Intradiari ( $MW$ ),
- $q_{i,t}^{B,s}$  és la variable que indica l'energia produïda en la unitat  $t$  en la hora  $i$  i escenari  $s$  del Mercat Intradiari ( $MWh$ ),
- $t_i^{B,s}$  és la variable que indica el total de l'energia produïda per totes les unitats en la hora  $i$  i escenari  $s$  del Mercat Intradiari ( $MWh$ ),
- $g_i^{B,s}$  és la funció que indica el benefici/retorn en la hora  $i$  i escenari  $s$  del Mercat Intradiari (€), i
- $C_t$  és el paràmetre que indica el cost de producció de la unitat  $t$  (€/MWh).

A diferència dels mercats anteriors, en la funció objectiu del Mercat Intradiari el terme corresponent a la retribució per l'energia assignada no s'expressa linealment respecte el preu simulat, sinó que es crea una funció per tal de representar aquest guany. En aquest mercat, es considera oportú construir el model tenint en compte la volatilitat del preu de l'energia d'aquest respecte les mateixes ofertes de les pròpies companyies, és a dir, estimar el valor de l'energia d'aquest mercat considerant *price-makers* a les generadores integrants. Seguidament, en la descripció de les constriccions que formen part del model en aquest mercat, es definirà l'expressió que s'ha donat a aquesta funció.

El funcionament del Mercat Intradiari és molt semblant al Mercat Diari. Aquest fet el veiem reflectit també en la funció objectiu, on notem que torna a aparèixer el terme que reflecteix el cost de producció de l'energia que s'assigna a cada unitat. Per contra, però, no hi ha cap terme que faci referència a l'esperança de benefici d'altres mercats. El motiu és clar, el Mercat Intradiari és, respecte la successió horària del Mercat Ibèric, l'últim de tots tres, de manera que si el primer té en compte el guany del segon i en aquest intervé el benefici del tercer ja s'aconsegueix enllaçar el profit dels tres mercats.

Seguidament, doncs, serà necessari descriure les constriccions fixades.

$$q_{i,t}^{D,s} + q_{i,t}^{B,s} + \frac{1}{2}q_{i,t}^{A,s} \leq P_i^{max} \quad \forall i \in I, \forall t \in T, \forall s \in S \quad (2.14)$$

$$q_{i,t}^{D,s} + q_{i,t}^{B,s} - \frac{1}{2}q_{i,t}^{A,s} \geq P_i^{min} \quad \forall i \in I, \forall t \in T, \forall s \in S \quad (2.15)$$

$$p_{i,t}^{D,s} + p_{i,t}^{B,s} \leq P_t^{max} \quad \forall i \in I, \forall t \in T, \forall s \in S \quad (2.16)$$

$$p_{i,t}^{D,s} + p_{i,t}^{B,s} \geq P_t^{min} \quad \forall i \in I, \forall t \in T, \forall s \in S \quad (2.17)$$

$$p_{i,t}^{D,s} + p_{i,t}^{B,s} - (p_{i,(t-1)}^{D,s} + p_{i,(t-1)}^{B,s}) \leq (1 - on_{i,t}^s)R_t^{up} \quad \forall i \in I, \forall t \in T, \forall s \in S \quad (2.18)$$

$$p_{i,(t-1)}^{D,s} + p_{i,(t-1)}^{B,s} - (p_{i,t}^{D,s} + p_{i,t}^{B,s}) \leq (1 - on_{i,t}^s)R_t^{down} \quad \forall i \in I, \forall t \in T, \forall s \in S \quad (2.19)$$

$$q_{i,t}^{B,s} = \frac{1}{2}(p_{i,(t-1)}^{B,s} + p_{i,t}^{B,s}) \quad \forall i \in I, \forall t \in T, \forall s \in S \quad (2.20)$$

$$t_i^{B,s} = \sum_{t \in T} q_{i,t}^{B,s} \quad \forall i \in I, \forall s \in S \quad (2.21)$$

$$g_i^{B,s} = t_i^{B,s}(\alpha_i^s + \beta_i^s t_i^{B,s}) \quad \forall i \in I, \forall s \in S \quad (2.22)$$

on:

- $P_t^{max}$  és el paràmetre que indica la capacitat màxima de la unitat  $t$  (MW),
- $P_t^{min}$  és el paràmetre que indica la potència mínima que genera la unitat  $t$  (MW),
- $R_t^{up}$  és el paràmetre que indica l'augment màxim d'energia de la unitat  $t$  (MWh),
- $R_t^{down}$  és el paràmetre que indica la disminució màxima d'energia de la unitat  $t$  (MWh),
- $\alpha_i^s$  és el paràmetre que indica l'ordenada a l'origen de la recta a partir de la qual es calcula el preu del Mercat Intradiari en la hora  $i$  i escenari  $s$  (€/MWh), i
- $\beta_i^s$  és el paràmetre que indica pendent de la recta a partir de la qual es calcula el preu del Mercat Intradiari en la hora  $i$  i escenari  $s$  (€/MWh<sup>2</sup>).



Tal i com es pot observar en l'expressió de les constriccions, en la modelització d'aquest últim mercat apareixen limitacions que engloben, també, als mercats anteriors.

En primer lloc, es pot analitzar com les dues primeres constriccions (2.14) i (2.15) fan referència a la limitació tècnica de cada unitat generadora respecte la seva pròpia capacitat de generació d'energia. Així doncs, l'energia assignada al Mercat Diari amb la del Mercat Intradiari i la meitat del que s'acorda que pot fluctuar l'energia produïda en el Mercat de Secundària, no ha de ser superior al màxim de l'energia que pot produir la unitat en concret. Anàlogament, considerant que la fluctuació també pot ser negativa, aquesta mateixa energia ha de ser com a mínim superior a aquell lliniar mínim, a sota del qual tècnicament cada unitat no pugui generar energia.

Així mateix, en les constriccions següents (2.16) i (2.17) també es reflecteixen les limitacions tècniques de producció, tant el lliniar superior com a l'inferior. En aquest cas, però, no fa referència a l'energia assignada al llarg d'un interval horari sinó a la potència adjudicada al final de cada període. Aquest és el motiu pel qual no s'inclou la potència corresponent al Mercat de Secundària, donat que en aquest mercat l'objectiu és la capacitat de fluctuació, no la potència en un moment determinat.

A continuació es troben dues constriccions (2.18) i (2.19) que, si bé també fan referència a restriccions tècniques de les unitats generadores, no ho fan respecte la capacitat de producció d'aquestes. Es coneix com a 'rampa a pujar' o 'rampa a baixar' la capacitat en augmentar o disminuir respectivament la potència que es genera en una hora. Així doncs, la cinquena i sisena restricció limiten la variació de la potència generada quan la unitat no participa en el Mercat de Secundària.

La següent restricció apareix en el Mercat Diari i Intradiari ((2.2) i (2.6) respectivament): expressa l'energia a generar en una hora com la mitjana de la potència assignada al final d'aquell interval horari i l'anterior.

De la mateixa manera, la penúltima restricció (2.21) també ha aparegut en els mercats anteriors en les constriccions (2.3) i (2.7). Es defineix la variable  $t_i^{B,s}$  com el sumatori de l'energia generadora per totes les unitats en aquell interval horari i escenari.

Per acabar, apareix la restricció (2.22), expressant de forma quadràtica la retribució d'aquest mercat. Així doncs, en els mercats anteriors el benefici de la venda d'energia s'expressava linealment respecte l'energia produïda. En aquest cas, sota la visió de que les unitats són *price-makers*, el preu depèn de la mateixa energia de manera que s'expressa linealment en funció d'aquest com  $\alpha_i^s + \beta_i^s t_i^{B,s}$ . Així doncs, tenint en compte que aquest és el preu que s'atribueix a l'energia  $t_i^{B,s}$ , el benefici resulta, com ja s'ha mencionat, de l'expressió quadràtica  $t_i^{B,s}(\alpha_i^s + \beta_i^s t_i^{B,s})$ . En el següent apartat es procedeix a linealitzar l'expressió.

En una visió general, és important fer notar que en les constriccions de la

modelització per aquest mercat no es considera la no-anticipació. En aquest cas, els escenaris que es consideren són els del Mercat Intradiari, és a dir, l'últim nus de cada branca. Així doncs, és lògic que, a diferència dels mercats anteriors, no sigui necessària una restricció d'aquestes característiques.

Així doncs, notem com, tot i que la modelització a grans trets és força similar a la dels altres mercats, en aquesta es fixen restriccions que engloben a tots els mercats garantint el compliment de requeriments tècnics imposats per les unitats generadores. En particular, encara que la funció objectiu no contingui un terme d'esperança de benefici d'altres mercats, segueix la mateixa estructura que la ja estudiada en els mercats anteriors, tret de l'expressió del guany, donat que aquest no es defineix linealment.

Per tant, i en conclusió, els tres problemes plantejats (un per a cada mercat respectivament) s'enllacen i complementen donant solució al problema de plantejar la corba d'oferta òptima tenint en compte el benefici dels tres mercats. Tanmateix, aquesta formulació es pot plantejar de forma compacta de manera que, mitjançant la introducció d'algun altre canvi, es pot facilitar la seva resolució.

### 2.3.4 Formulació compacta

La formulació estocàstica compacta de l'estratègia d'oferta òptima presentada mercat a mercat, expressa la seva funció objectiu ponderant cada escenari amb una certa probabilitat com

$$\max_{s \in S} \sum_i \left[ \sum_i (t_i^{D,s} \lambda_i^{D,s} - \sum_{t \in T} C_t q_{i,t}^{D,s}) + \sum_{i \in I} (t_i^{A,s} \lambda_i^{A,s}) + \left[ \sum_{i \in I} (g_i^{B,s} - \sum_{t \in T} C_t q_{i,t}^{B,s}) \right] \right] \pi_s \quad (2.23)$$

on  $\pi_s$  és la probabilitat de l'escenari  $s$ .

Clarament, en la funció objectiu s'observen tres termes desglossats corresponents als tres mercats que es modelitzen. En el primer d'ells, s'exposa un terme que recull el benefici de la venda de l'energia excloent-ne el seu cost, fent referència al Mercat Diari. En segon lloc, només es troba un únic terme que correspon a la retribució que s'obté de la reserva de capacitat de fluctuació en el Mercat de Secundària, sense, coherentment, cap terme que de cost de producció. En l'últim terme, reflectant el Mercat Intradiari, s'exposa la diferència entre el guany i el cost de la producció de l'energia assignada, considerant, però, que el guany s'expressa funció de la mateixa energia.

El conjunt de constriccions que es fixen es divideixen en tres blocs per tal de facilitar la seva comprensió, així com la seva organització. El primer bloc es presenta a continuació:

$$q_{i,t}^{D,s} - q_{i,t}^{D,s'} \leq 0 \quad \forall s, s' \in S | (O(\lambda_i^{D,s}) + 1 = O(\lambda_i^{D,s'})), \forall i \in I, \forall t \in T \quad (2.24)$$

$$p_{i,t}^{D,s} = p_{i,t}^{D,s'} \quad \forall s, s' \in S | (\lambda_i^{D,s} = \lambda_i^{D,s'} \forall i \in I), \forall t \in T \quad (2.25)$$

$$p_{i,t}^{A,s} = p_{i,t}^{A,s'} \quad \forall s, s' \in S | ((\lambda_i^{D,s}, \lambda_i^{A,s}) = (\lambda_i^{D,s'}, \lambda_i^{A,s'}) \forall i \in I), \forall t \in T \quad (2.26)$$

$$t_i^{m,s} = \sum_{t \in T} q_{i,t}^{m,s} \quad \forall i \in I, \forall s \in S, \forall m \in M \quad (2.27)$$

$$q_{i,t}^{m,s} = \frac{1}{2}(p_{i,(t-1)}^{m,s} + p_{i,t}^{m,s}) \quad \forall i \in I, \forall t \in T, \forall s \in S, \forall m \in M \quad (2.28)$$

on

- $M$  és el conjunt del Mercat Diari ( $D$ ), el Mercat de Secundària o AGC ( $A$ ) i el Mercat Intradiari o *Balancing* ( $B$ ).

La primera constricció del primer bloc d'aquestes, pertinent al Mercat Diari, fixa la condició per la qual el resultat de la resolució del problema es pot prendre com a corba d'oferta: ser creixent la potència ofertada respecte el preu. A continuació es situen les constriccions de no-anticipació pel Mercat Diari i el Mercat de Secundària. Tenint en compte les dues últimes equacions d'aquest primer bloc, referents als tres mercats, tant sols fixen la definició de la variable de l'energia  $q_{i,t}^{m,s}$  i el total d'aquesta per cada interval horari, escenari i mercat  $t_i^{m,s}$ .

A continuació es presenta el segon bloc de constriccions:

$$q_{i,t}^{D,s} + q_{i,t}^{B,s} + \frac{1}{2}q_{i,t}^{A,s} \leq P_t^{max} \quad \forall i \in I, \forall t \in T, \forall s \in S \quad (2.29)$$

$$q_{i,t}^{D,s} + q_{i,t}^{B,s} - \frac{1}{2}q_{i,t}^{A,s} \geq P_t^{min} \quad \forall i \in I, \forall t \in T, \forall s \in S \quad (2.30)$$

$$p_{i,t}^{D,s} + p_{i,t}^{B,s} \leq P_t^{max} \quad \forall i \in I, \forall t \in T, \forall s \in S \quad (2.31)$$

$$p_{i,t}^{D,s} + p_{i,t}^{B,s} \geq P_t^{min} \quad \forall i \in I, \forall t \in T, \forall s \in S \quad (2.32)$$

$$p_{i,t}^{D,s} + p_{i,t}^{B,s} - (p_{i,(t-1)}^{D,s} + p_{i,(t-1)}^{B,s}) \leq (1 - on_{i,t}^s)R_t^{up} \quad \forall i \in I, \forall t \in T, \forall s \in S \quad (2.33)$$

$$p_{i,(t-1)}^{D,s} + p_{i,(t-1)}^{B,s} - (p_{i,t}^{D,s} + p_{i,t}^{B,s}) \leq (1 - on_{i,t}^s)R_t^{down} \quad \forall i \in I, \forall t \in T, \forall s \in S \quad (2.34)$$

$$g_i^{B,s} = t_i^{B,s}(\alpha_i^s + \beta_i^s t_i^{B,s}) \quad \forall i \in I, \forall s \in S \quad (2.35)$$

$$q_{i,t}^{A,s} \leq on_{i,t}^s P_t^A \quad \forall i \in I, \forall t \in T, \forall s \in S \quad (2.36)$$

$$on_{i,t}^s \in \{0, 1\} \quad \forall i \in I, \forall t \in T, \forall s \in S \quad (2.37)$$

Aquest bloc està compost, fonamentalment, per totes aquelles restriccions imposades per tal de garantir un correcte funcionament de la generació energètica per part de totes les unitats, tant a nivell de llindars de potència de producció com de rampes d'augment o disminució. A més a més, també en formen part constriccions pròpies del correcte funcionament del Mercat de Secundària (variable binària  $w_{i,t}^s$ ).

El tercer i últim bloc de constriccions representa la funció que expressa el benefici de la venda d'energia en el Mercat Intradiari (2.30). Tal i com s'ha descrit en la part de la formulació del Mercat Intradiari, el preu de l'energia d'aquest mercat depèn de la mateixa energia que es presenti. Aquest fet motiva l'obtenció d'una funció quadràtica respecte l'energia per descriure el guany obtingut com a retribució de la venda d'energia.

A continuació es presenten les constriccions resultants de la linealització de l'expressió (2.35):

$$g_i^{B,s} = \sum_{n=1}^B \left( \alpha_i^s + \frac{2T_i^{max}(2n - (B+1))\beta_i^s}{B} \right) t_{i,n}^{B,s} \quad \forall i \in I, \forall s \in S \quad (2.38)$$

$$\frac{-T_i^{max}}{\frac{B}{2}} \leq t_{i,n}^{B,s} \leq 0 \quad \forall n \leq \frac{B}{2}, \forall i \in I, \forall s \in S \quad (2.39)$$

$$0 \leq t_{i,n}^{B,s} \leq \frac{T_i^{max}}{\frac{B}{2}} \quad \forall n \leq \frac{B}{2}, \forall i \in I, \forall s \in S \quad (2.40)$$

$$t_i^{B,s} = \sum_{n=1}^B t_{i,n}^{B,s} \quad \forall t_i^{B,s} \in (-T_i^{max}, T_i^{max}), \forall i \in I, \forall s \in S \quad (2.41)$$

on:

- $B$  és el conjunt que indica el número de blocs amb què es linealitzava la funció de retribució del Mercat Intradari,
- $T_i^{max}$  és la variable que indica el valor de potència màxima venuda en el Mercat Intradari en una hora  $h$ ,
- $t_{i,n}^{B,s}$  és la variable que indica el total d'energia produïda en el bloc  $n$ , en l'interval horari  $i$  i escenari  $s$  ( $MWh$ ).

Coherentment amb l'expressió del benefici presentat en la formulació del Mercat Intradari  $g_i^{B,s} = t_i^{B,s} (\alpha_i^s + \beta_i^s t_i^{B,s})$ , el conjunt de constriccions que formen el tercer bloc haurien de ser equivalents. A continuació s'analitza la linealització presentada tot estudiant l'equivalència de (2.35) amb la formulació anterior (2.38), ..., (2.41).

Així doncs, es vol demostrar que les constriccions (2.35) i (2.38) expressen el mateix, una de forma quadràtica i l'altre lineal, de manera que:

$$\sum_{n=1}^B \left( \alpha_i^s + \frac{2T_i^{max}((2n - (B+1))\beta_i^s)}{B} t_{i,n}^{B,s} \right) \simeq t_i^{B,s} (\alpha_i^s + \beta_i^s t_i^{B,s}) \quad (2.42)$$

Desenvolupant el terme esquerra s'obté

$$g_i^{B,s} = \sum_{n=1}^B \left( \alpha_i^s + \frac{2T_i^{\max}(2n-(B+1))\beta_i^s}{B} \right) t_{i,n}^{B,s} \quad (2.43)$$

$$= \sum_{n=1}^B \left( \alpha_i^s t_{i,n}^{B,s} + \frac{2T_i^{\max}(2n-(B+1))\beta_i^s}{B} t_{i,n}^{B,s} \right) \quad (2.44)$$

$$= \sum_{n=1}^B \alpha_i^s t_{i,n}^{B,s} + \sum_{n=1}^B \frac{2T_i^{\max}(2n-(B+1))\beta_i^s}{B} t_{i,n}^{B,s} \quad (2.45)$$

$$= \alpha_i^s \sum_{n=1}^B t_{i,n}^{B,s} + \sum_{n=1}^B \frac{2T_i^{\max}(2n-(B+1))\beta_i^s}{B} t_{i,n}^{B,s} \quad (2.46)$$

$$= \underbrace{\alpha_i^s t_i^{B,s}}_{(1)} + \underbrace{\sum_{n=1}^B \frac{2T_i^{\max}(2n-(B+1))\beta_i^s}{B} t_{i,n}^{B,s}}_{(2)} \quad (2.47)$$

i, del dret

$$g_i^{B,s} = t_i^{B,s} (\alpha_i^s + \beta_i^s t_i^{B,s}) \quad (2.48)$$

$$= \underbrace{\alpha_i^s t_i^{B,s}}_{(1')} + \underbrace{\beta_i^s (t_i^{B,s})^2}_{(2')} \quad (2.49)$$

per tant, donat que (1) = (1'), manca per veure que (2) és una aproximació lineal de (2'):

$$\underbrace{\sum_{n=1}^B \frac{2T_i^{\max}(2n-(B+1))\beta_i^s}{B} t_{i,n}^{B,s}}_{(2)} \simeq \underbrace{\beta_i^s (t_i^{B,s})^2}_{(2')} \quad (2.50)$$

o, equivalentment,

$$\underbrace{\sum_{n=1}^B \frac{2T_i^{\max}(2n-(B+1))}{B} t_{i,n}^{B,s}}_{(2)} \simeq \underbrace{(t_i^{B,s})^2}_{(2')} \quad (2.51)$$

Així doncs, a continuació es calcula la recta per la qual s'aproxima  $(t_i^{B,s})^2$ , expressant per trams la variable  $t_i^{B,s}$  mitjançant intervals de llargada  $\frac{T_i^{max}}{2}$  representats per la variable  $t_{i,n}^{B,s}$ . En conseqüència, s'expressarà  $t_i^{B,s}$  com  $\sum_{n=1}^B t_{i,n}^{B,s}$ .

El pendent de la recta entre dos punts d'abscisses  $x_0 = \frac{kT_i^{max}}{2}$  i  $x_1 = \frac{(k+1)T_i^{max}}{2}$  i ordenades, donada la funció a aproximar,  $y_0 = \left(\frac{kT_i^{max}}{2}\right)^2$  i  $y_1 = \left(\frac{(k+1)T_i^{max}}{2}\right)^2$  es calcula com

$$\frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{\left(\frac{(k+1)T_i^{max}}{2}\right)^2 - \left(\frac{kT_i^{max}}{2}\right)^2}{\frac{(k+1)T_i^{max}}{2} - \frac{kT_i^{max}}{2}} = \frac{[(k+1)^2 - k^2](T_i^{max})^2}{\frac{T_i^{max}}{2}} = \frac{(2k+1)(T_i^{max})^2}{\left(\frac{B}{2}\right)^2} \frac{\frac{B}{2}}{T_i^{max}} = \frac{(2k+1)T_i^{max}}{\frac{B}{2}}$$

Expressant  $k$  en funció de  $n$  i  $B$ , és a dir, fent el canvi de variable  $k = n - \frac{B}{2} - 1$  s'obté el pendent

$$\frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{(2n - (B+1))T_i^{max}}{\frac{B}{2}} \quad (2.52)$$

Per tant, tal i com volíem veure, l'expressió  $\sum_{n=1}^B \frac{2T_i^{max}(2n-(B+1))}{B} t_{i,n}^{B,s}$  és el resultat de la linealització de  $\beta_i^s (t_i^{B,s})^2$ .

Observem, al següent apartat, la formulació final del model multi-oferta.

### 2.3.5 Formulació final

En conclusió, doncs, tal i com s'ha descrit totes les constriccions s'expressen de forma lineal. Per tant, es planteja un problema de programació lineal entera mixt, la formulació final del qual resta:

$$\begin{aligned}
\max \quad & \sum_s \left[ \sum_i (t_i^{D,s} \lambda_i^{D,s} - \sum_t C_t q_{i,t}^{D,s}) \right] \pi_s + \sum_s \left[ \sum_i (t_i^{A,s} \lambda_i^{A,s}) \right] \pi_s + \sum_s \left[ \sum_i (g_i^{B,s} - \sum_t C_t q_{i,t}^{B,s}) \right] \pi_s \\
\text{s.a.} \quad & \left\{ \begin{aligned}
& q_{i,t}^{D,s} - q_{i,t}^{D,s'} \leq 0 \quad \forall s, s' \in S | (O(\lambda_i^{D,s}) + 1 = O(\lambda_i^{D,s'})), \forall i \in I, \forall t \in T \\
& p_{i,t}^{D,s} = p_{i,t}^{D,s'} \quad \forall s, s' \in S | (\lambda_i^{D,s} = \lambda_i^{D,s'} \forall i \in I), \forall t \in T \\
& p_{i,t}^{A,s} = p_{i,t}^{A,s'} \quad \forall s, s' \in S | ((\lambda_i^{D,s}, \lambda_i^{A,s}) = (\lambda_i^{D,s'}, \lambda_i^{A,s'}) \forall i \in I), \forall t \in T \\
& t_i^{m,s} = \sum_{t \in T} q_{i,t}^{m,s} \quad \forall i \in I, \forall s \in S, \forall m \in M \\
& q_{i,t}^{m,s} = \frac{1}{2} (p_{i,(t-1)}^{m,s} + p_{i,t}^{m,s}) \quad \forall i \in I, \forall t \in T, \forall s \in S, \forall m \in M \\
& q_{i,t}^{D,s} + q_{i,t}^{B,s} + \frac{1}{2} q_{i,t}^{A,s} \leq P_t^{\max} \quad \forall i \in I, \forall t \in T, \forall s \in S \\
& q_{i,t}^{D,s} + q_{i,t}^{B,s} - \frac{1}{2} q_{i,t}^{A,s} \geq P_t^{\min} \quad \forall i \in I, \forall t \in T, \forall s \in S \\
& p_{i,t}^{D,s} + p_{i,t}^{B,s} \leq P_t^{\max} \quad \forall i \in I, \forall t \in T, \forall s \in S \\
& p_{i,t}^{D,s} + p_{i,t}^{B,s} \geq P_t^{\min} \quad \forall i \in I, \forall t \in T, \forall s \in S \\
& p_{i,t}^{D,s} + p_{i,t}^{B,s} - (p_{i,(t-1)}^{D,s} + p_{i,(t-1)}^{B,s}) \leq (1 - on_{i,t}^s) R_t^{up} \quad \forall i \in I, \forall t \in T, \forall s \in S \\
& p_{i,(t-1)}^{D,s} + p_{i,(t-1)}^{B,s} - (p_{i,t}^{D,s} + p_{i,t}^{B,s}) \leq (1 - on_{i,t}^s) R_t^{down} \quad \forall i \in I, \forall t \in T, \forall s \in S \\
& q_{i,t}^{A,s} \leq on_{i,t}^s P_t^A \quad \forall i \in I, \forall t \in T, \forall s \in S \\
& g_i^{B,s} = \sum_{n=1}^B \left( \alpha_i^s + \frac{2T_i^{\max}(2n-(B+1))\beta_i^s}{B} \right) t_{i,n}^{B,s} \quad \forall i \in I, \forall s \in S \\
& \frac{-T_i^{\max}}{2} \leq t_{i,n}^{B,s} \leq 0 \quad \forall n \leq \frac{B}{2}, \forall i \in I, \forall s \in S \\
& 0 \leq t_{i,n}^{B,s} \leq \frac{T_i^{\max}}{2} \quad \forall n \leq \frac{B}{2}, \forall i \in I, \forall s \in S \\
& t_i^{B,s} = \sum_{n=1}^B t_{i,n}^{B,s} \quad \forall t_i^{B,s} \in (-T_i^{\max}, T_i^{\max}), \forall i \in I, \forall s \in S \\
& q_{i,t}^{m,s} \geq 0, p_{i,t}^{m,s} \geq 0, t_i^{m,s} \geq 0, t_{i,n}^{B,s} \geq 0 \quad \forall m \in M, \forall i \in I, \forall t \in T, \forall s \in S, \forall n \in B \\
& on_{i,t}^s \in \{0, 1\} \quad \forall i \in I, \forall t \in T, \forall s \in S
\end{aligned} \right.
\end{aligned}$$



## 2.4 Anàlisi dels resultats

El pas posterior a l'anàlisi del model i implementació d'aquest és l'estudi dels resultats que s'obtenen. A continuació es presenten les solucions obtingudes per, en primer lloc, realitzar un anàlisi comparatiu d'aquests respecte els que consten a l'article i valorar, així, la correctesa de la implementació del model i, en segon lloc, estudiar el cost computacional que aquest comporta. Addicionalment es presenta, també, un anàlisi qualitatiu sobre els resultats obtinguts.

### 2.4.1 Anàlisi comparatiu: implementació vs article

En la replicació del model exposat en l'article [11] i la posterior execució s'obtenen, com a resultat, valors que haurien de coincidir amb els mencionats a l'article, tenint en compte un cert marge raonable.

Tanmateix, tot i l'exhaustiva revisió i anàlisi del model i la coherència de les solucions obtingudes, existeixen diferències en els resultats. A continuació, a la taula 2.1 es mostren els resultats obtinguts en les execucions del nou model en els diversos dies i, per tant, dades, tractades a l'article esmentat. En particular, doncs, aquests dies son la setmana del set a l'onze de juny del 2.004. Tal i com es pot observar, existeixen divergències entre els resultats obtinguts en la replicació de la implementació del model i els que consten a l'article. Tot i així, la magnitud de la diferència no es considera rellevant donat que, en termes relatius, no té un impacte considerablement gran en cap dels casos.

| COMPARATIVA DE RESULTATS ARTICLE CONTRA IMPLEMENTACIÓ |         |                   |            |              |
|---|---------|-------------------|------------|--------------|
| DIA   | PAPER   | MODEL IMPLEMENTAT | DIFERÈNCIA | DIFERÈNCIA % |
| 7   | 189.370 | 194.841           | 5.471      | 2,81         |
| 8   | 413.966 | 434.599           | 20.632     | 4,75         |
| 9   | 89.660  | 81.757            | 7.903      | 9,67         |

Taula 2.1: Comparativa resultats article vs implementació rèplica (*expressats en €*).

Malgrat tot, donada l'existència d'aquesta diferència entre els resultats assolits i els exposats en l'article, es procedeix a comparar les solucions amb més detall amb l'objectiu de poder deduir-ne algun motiu. Sent impossible a partir de les dades que

consten en aquest, es comunica als autors la manca d'informació i es demana la solució completa per tal de poder, així, comparar les dues solucions més acuradament.

A la taula 2.2 es mostra la diferència entre els resultats obtinguts a nivell de cada unitat generadora, pel Mercat Diari, en el cas de la solució obtinguda a partir de les dades de dilluns 7 de juny del 2004. Estudiant en detall l'anàlisi s'observa com, per algunes unitats, les diferències són importants. Igualment, la mateixa conclusió és vàlida per la divergència que apareix en el total del Mercat Diari. L'objectiu de la modelització resolta, però, s'imposa en termes generals, és a dir, a nivell de totes les unitats generadores. Per tant, dues solucions similars a nivell de benefici global òptim poden venir donades per valors concrets de les diferents unitats. Aquest és el motiu pel qual el resultat total del model, que engloba als tres mercats, és semblant, encara que els valors concrets obtinguts per a cada unitat i mercat siguin diferents.

Així doncs, el benefici obtingut és el mateix, o similar, però es distribueix de forma distinta. Encara que aquesta diferència representa un 12% aproximadament respecte el benefici estimat pel Mercat Diari, només és un 3% del benefici estimat per tots tres mercats. Per tant, la solució obtinguda en la replicació del model sembla distribuir el guany en més percentatge en el Mercat de Secundària i el mercat Intradiari, donat que, tot i que la diferència en benefici del Mercat Diari sigui gran, la diferència a nivell global és bastant menor i, fins i tot, en sentit contrari, és a dir, la xifra assolida en la replicació és major que en l'article.

| COMPARATIVA DE RESULTATS PER UNITATS DEL MERCAT DIARI |         |         |            |              |
|---|---------|---------|------------|--------------|
| UNITAT  | ARTICLE | RÈPLICA | DIFERÈNCIA | DIFERÈNCIA % |
| 1   | 36.962  | 29.753  | 7.209      | 19.50        |
| 2   | 54.834  | 45.326  | 9.508      | 17.34        |
| 3   | 58.202  | 44.866  | 13.337     | 22.91        |
| 4   | 27.199  | 26.95   | 248        | 0.91         |
| 5   | -5.761  | -2.317  | -3.445     | 59.79        |
| 6   | -12.676 | -4.428  | -8.248     | 65.07        |
| TOTAL DIARI   | 158.760 | 140.151 | 18.609     | 11.72        |
| TOTAL MODEL   | 189.370 | 194.894 | -5.524     | 2.92         |

Taula 2.2: Comparativa de resultats entre unitats al Mercat Diari (*expressats en €*).

Paral·lelament, i amb la fita d'obtenir més punts d'estudi, s'implementa el que generalment es defineix com a cas determinista per tal de poder realitzar la comparació,

també, de la solució obtinguda en aquest cas. Així doncs, s'executa el programa implementat en un conjunt de dades determinista, sent aquest la mitjana ponderada dels escenaris de l'arbre a partir del qual es calcula la solució estocàstica. Aquest valor s'anomena EEV. Tal i com s'observa en la taula 2.3, on es presenten els resultats en milions d'euros com a unitat per limitacions dels valors disponibles de l'article, no existeixen divergències notòries.

| COMPARATIVA RESULTATS DETERMINISTES ARTICLE CONTRA IMPLEMENTACIÓ |       |                   |            |              |
|--|-------|-------------------|------------|--------------|
| DIA  | PAPER | MODEL IMPLEMENTAT | DIFERÈNCIA | DIFERÈNCIA % |
| 7  | 185,6 | 185,6             | 0          | 0            |
| 8  | 413,2 | 409,8             | 3          | 0,82         |
| 9  | 85,6  | 79,6              | 6          | 7,58         |

Taula 2.3: Comparativa resultats deterministes article vs implementació rèplica (expressats en milers d'euros).

En la figura 2.4 es mostren les funcions d'ofertes, és a dir, el preu al que s'ofereix l'energia per a les sis unitats participants en la modelització en una hora determinada pel Mercat Diari. Aquestes s'han construït d'acord amb les parelles escenari - energia tal i com es defineixen en l'article [11]. Tal i com es pot observar, les funcions resultants per cada unitat no presenten similituds.

Així doncs, i en conclusió, es pot afirmar que l'impacte de la divergència obtinguda en la implementació de la modelització presentada en l'article [11] no és, doncs, rellevant. Els resultats aconseguits són coherents i, després de realitzar un estudi minuciós sobre el compliment de les constriccions, vàlids. La implementació rèplica del model d'oferta òptima es considera correcta.

## 2.4.2 Anàlisi computacional i econòmic

A continuació es presenta el cost computacional que ha comportat la resolució del model. El següent anàlisi tant es centra en el cost temporal com en els mètodes invocats per a la resolució d'aquest. En concret, com a resolutor s'ha utilitzat AMPL+CPLEX 11.0, executant-se en 4 processadors AMD Opteron 2222 de 3 GHz i 32 Gb de memòria RAM.

En el quadre 2.4 es presenta la solució, el nombre de nodes explotats mitjançant Branch-and-Bound, el nombre d'iteracions del símplex, el temps de resolució i el GAP

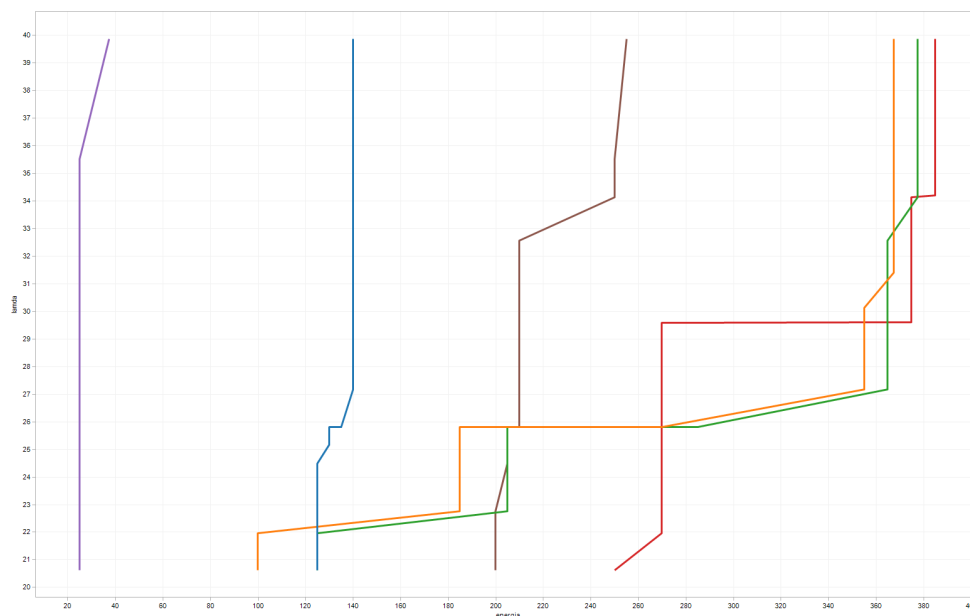


Figura 2.4: Funcions d'oferta per al Mercat Diari.

finalment obtingut en un temps de límit de 2.400 segons per a totes les execucions del model en els diversos dies fixats.

| COSTOS COMPUTACIONALS FIXANT TEMPS MÀXIM |                   |       |         |             |       |
|--|-------------------|-------|---------|-------------|-------|
| DIA                                      | BENEFICI TOTAL(€) | B&B   | MIP     | TEMPS EXEC. | GAP % |
| 7  | 194.841           | 692   | 83.980  | 2.400       | 0,30  |
| 8  | 434.599           | 5.340 | 414.735 | 2.400       | 0,06  |
| 9  | 81.757            | 5.051 | 369.104 | 2.400       | 0,48  |

Taula 2.4: Costos computacionals I (*temps expressat en segons*)

El temps límit fixat és, en la majoria de casos, suficient per tal d'aconseguir una solució prou propera a l'òptim. Tanmateix, es pot plantejar si aquest temps és necessari o, si per contra, amb molt menys temps la solució obtinguda és qualitativament igual de bona. Al quadre 2.5 es presenten els resultats anàlegs al quadre 2.4 però, enlloc de fixant un temps límit i analitzant la solució trobada amb seu GAP, fitant un valor GAP

a partir del qual trobar referència del temps necessari perquè aquest sigui obtingut. En el primer grup d'execucions es fixa com a llindar d'aturada el valor GAP del 1%, i en el segon el valor és de 0,5%. Només pel cas del dia 9, s'observa una diferència important entre el temps necessari per afitar el GAP a un 1% i el necessari per fixar-lo a 0,5%: en aquest cas, fixar com a GAP acceptable un 1% presenta avantatge en cost computacional respecte el guany que en la solució s'obté fixant-lo a 0,5%. En la resta de casos, si bé existeix un canvi en el nombre d'iteracions simplex executades i en el nombre de nodes explorats en l'algorisme Branch&Bound, aquest no es veu reflectit en el temps d'execució.

| COSTOS COMPUTACIONALS FIXANT GAP MÍNIM |                   |       |         |             |       |
|--|-------------------|-------|---------|-------------|-------|
| DIA                                    | BENEFICI TOTAL(€) | B&B   | MIP     | TEMPS EXEC. | GAP % |
| 7                                      | 194.015           | 0     | 17.347  | 32          | 0,76  |
| 8                                      | 434.457           | 0     | 8.628   | 16          | 0,15  |
| 9                                      | 81.547            | 290   | 27.303  | 198         | 0,96  |
| 7                                      | 194.668           | 590   | 44.465  | 361         | 0,41  |
| 8                                      | 434.457           | 0     | 8.628   | 11          | 0,15  |
| 9                                      | 81.744            | 4.920 | 359.949 | 2.203       | 0,50  |

Taula 2.5: Costos computacionals II (*temps expressat en segons*)

Per tal d'analitzar l'impacte del diversos temps d'execució i els seus corresponents GAP's a nivell de resultats econòmics, a continuació es mostren les sortides obtingudes amb les dades de dilluns 7 de juny 04 fixant, com a GAP d'aturada, diversos valors. A més a més, com a reflex de l'anterior en la taula 2.6 hi consten el nombre de nodes explorats mitjançant Branch-and-Bound o el nombre d'iteracions realitzades de simplex.

Com s'observa en la taula 2.6 la diferència a nivell econòmic entre la solució obtinguda en l'execució de 30 segons i en la de 2.400 segons no és rellevant, en totes les execucions el valor relatiu de GAP que s'aconsegueix és prou petit com perquè aquesta diferència no sigui significativa. Per tant, realitzant un balanç entre els cost computacional i el valor de la solució obtinguda econòmicament parlant es consideraria suficient un temps d'execució de 300 segons, amb el qual s'assegura un GAP relatiu menor al 0,5%.

En conclusió, doncs, s'observa com el problema d'optimització plantejat no comporta un cost computacional de magnituds importants per a la seva resolució,

| EXECUCIONS AMB DADES A DILLUNS 7 DE JUNY 04 |     |        |             |      |
|---|-----|--------|-------------|------|
| BENEFICI TOTAL(€)                           | B&B | MIP    | TEMPS EXEC. | GAP  |
| 193.603                                     | 0   | 17.347 | 30          | 0,97 |
| 194.140                                     | 0   | 17.870 | 60          | 0,68 |
| 194.389                                     | 3   | 18049  | 120         | 0,56 |
| 194.529                                     | 301 | 32.638 | 300         | 0,49 |
| 194.746                                     | 591 | 44.465 | 600         | 0,37 |
| 194.746                                     | 591 | 73.587 | 1.200       | 0,31 |
| 194.761                                     | 692 | 83.980 | 2.400       | 0,30 |

Taula 2.6: Costos computacionals III (*temps expressat en segons*)

obtenint-ne valors significatius en les solucions amb temps d'execucions petits.

## 2.5 Conclusions i possibles millores

En la formulació plantejada en l'article [11] es té per objectiu maximitzar la funció d'oferta de les unitats elèctriques generadores tenint en compte el Mercat Diari, el de Secundària i el Intradiari. Es realitza enfocant els tres mercats de formes diferents: en primer lloc el Mercat Diari; en segon el de Secundària, de naturalesa molt distinta; i en tercer l'Intradiari, el qual tot i funcionar de forma anàloga al Mercat Diari es planteja tot considerant les generadores *price-maker*, fet que canvia la formulació d'aquest.

Els objectius fonamentals del capítol, és a dir, la comprensió, replicació i resolució del model, es duen a terme satisfactòriament d'acord amb els resultats mostrats durant aquest. D'acord amb l'exposat en apartats anteriors la formulació es tradueix en un problema de programació lineal entera mixt, el qual no comporta un alt cost computacional en la seva resolució.

En els següents capítols, es plantegen possibles millores d'aquest model bàsic. En primer lloc es planteja el fet de formular quadràticament els costos de generació de l'energia elèctrica de les unitats elèctriques conjuntament amb un nou model d'oferta òptima: aquest fet s'explora en el següent capítol. En segon lloc, es planteja la incorporació en la modelització de la funció d'oferta el fet que aquesta sigui esglaonada, tal i com en el funcionament del Mercat Ibèric Elèctric s'exigeix. Aquesta segona millora s'aborda en el quart capítol.

Així doncs, a continuació es presenta l'anàlisi i resolució de les propostes plantejades.

## Capítol 3

# Millora 1: Model continu d'oferta òptima

Un model d'oferta òptima que es basa en l'optimització dels beneficis, es fonamenta, com primer graó, en la definició dels guanys així com dels costos de producció. Si bé la definició de la retribució fixada per cada mercat és inherent a cada un d'aquests, no és igual d'inamovible en el cas dels costos. Aquest és el motiu pel qual la definició dels costos de producció d'una unitat generadora és d'especial rellevància.

### 3.1 Plantejament

En el present apartat s'exposen i descriuen els principals canvis i punts de vista que es desenvolupen per tal de poder-ne plasmar en la nova modelització. En primer lloc s'expressa la nova forma amb que determinen els costos de producció i, en segon, la nova funció d'oferta que es defineix, entre d'altres, tenint en compte aquests.

Com a supòsit previ al desenvolupament de la nova formulació proposta, cal enunciar que en aquest capítol i el següent s'aproximarà l'energia com la potència. Per tant, s'assimilarà que

$$q_{i,t}^{m,s} = p_{i,t}^{m,s} \quad \forall i \in I, \forall t \in T, \forall s \in S, \forall m \in M \quad (3.1)$$

enlloc de definir l'energia com

$$q_{i,t}^{m,s} = \frac{1}{2}(p_{i,(t-1)}^{m,s} + p_{i,t}^{m,s}) \quad \forall i \in I, \forall t \in T, \forall s \in S, \forall m \in M \quad (3.2)$$



Aquesta premissa comporta una simplificació en diversos punts de la formulació alhora que una pèrdua de precisió en altres. Tanmateix, tal i com en la descripció en la formulació del següent apartat es descriu, l'impacte d'aquest supòsit no es considera rellevant ni important. Conceptualment, la potència es mesura en un instant puntual del temps, en canvi, l'energia es mesura en un interval de temps. Suposar l'equivalència entre aquestes dues implica considerar que el canvi de potència es produeix al començament del període i es manté constant durant tota l'hora. Aquesta consideració és habitual en els treballs de l'optimització de mercats elèctrics [3]. Així doncs, a partir d'aquest capítol es parlarà d'energia o de potència indistintament.

El model d'oferta òptima tractat integra en la determinació d'aquesta oferta el Mercat Diari, el Mercat de Secundària i el Mercat Intradiari. Tal i com s'ha explicat anteriorment, en el Mercat Diari es compra energia, de manera que en els seus beneficis apareixen associats els costos de producció; el Mercat de Secundària no implica costos donat que es retribueix la capacitat de fluctuació sobre l'energia atorgada en altres mercats; i en el Mercat Intradiari tornen a aparèixer els costos de producció donat que el funcionament és anàleg al Diari.

En el model presentat en l'article [11] els costos de producció es determinen linealment tant en el Mercat Diari com en l'Intradiari per cada unitat  $t$  de manera que el benefici final de la venda de potència s'expressa com

$$B_t(P) = \lambda P - (c_0 + c_l P) \quad (3.3)$$

on:

- $\lambda$  és el coeficient que indica el preu al que es remunera la potència venuda
- $P$  és la quantitat de potència venuda
- $c_0$  i  $c_l$  són la constant i el coeficient del terme lineal a partir del qual s'estima el cost de producció de la potència venuda.

Tanmateix, i com a possible millora, en el Mercat Diari es planteja suposar que els costos de producció de potència elèctrica són quadràtics, és a dir, que el cost no depèn linealment respecte la quantitat de potència produïda sinó que en depèn quadràticament. Aquest és el comportament real de les centrals tèrmiques d'energia elèctrica, essent en realitat els costos lineals una aproximació. Així doncs, la funció de benefici del Mercat Diari  $B_t(P)$  amb costos quadràtics descrita en (3.3) s'expressaria com:

$$B_t(P) = \lambda P - (c_0 + c_l P + c_q P^2) \quad (3.4)$$

on  $c_q > 0$  és el coeficient del terme quadràtic a partir del qual s'estima el cost de producció de la potència venuda.

Tanmateix, el nostre model mantindrà la hipòtesi del model original de Conejo *et al.* de costos lineals pel Mercat Intradiari. El principal motiu és que a nivell de volum de les transaccions energètiques que s'hi duen, el Mercat Diari és el més important, i és el principal objectiu en el model multi-mercat donat que la oferta pels mercats posteriors es pot recalculer quan es coneix l'energia cassada finalment en aquest.

Així doncs, a més a més de la consideració de costos quadràtics en el Mercat Diari i al contrari del model de l'article [11], en el model que es presenta es vol distingir entre variables de primera i de segona etapa. Les de primera etapa són aquelles variables de decisió que s'han de prendre abans de l'observació de la realització de les variables aleatòries del model (preus de mercat). Aquestes variables no depenen de l'escenari i són les úniques variables de decisió en sentit estricte, donat que representen les decisions a prendre en el moment actual (també s'anomenen "here and now" variables). Les variables de segona etapa són aquelles que depenen de l'escenari, és a dir, d'alguna de les variable aleatòries  $i$ , tot i ser variables del model d'optimització, no són variables de decisió, en el sentit que no representen cap decisió a prendre en el moment actual. Les decisions a prendre en l'actualitat en el problema d'oferta òptima en mercats múltiples que, per tant, no han de dependre dels escenaris, són:

- (a) la quantitat de potència dedicada a cada mercat,  $i$
- (b) l'oferta òptima al mercat diari (en realitat una funció d'oferta).

El model de programació estocàstica de l'article [11] no obté aquesta informació de la forma habitual en la teoria de programació estocàstica ([10]), és a dir, amb la incorporació de variables de primera etapa ad-hoc, sinó que la elabora a posteriori a partir dels valors de les variables de segona etapa. Una alternativa al model [11], aplicada al Mercat Diari, són els models d'oferta òptima proposats en [7] i [8].

Per tal d'adaptar aquests models d'oferta òptima al model multi-mercat, es defineix la variable de primera etapa que indica la quantitat de potència a reservar pel Mercat Diari com  $p_{i,t}^{Diari}$  per cada unitat  $t$  i interval horari  $i$ , és a dir, la quantitat de potència que com a màxim s'ofertarà en aquest mercat. Així doncs, aquesta potència haurà de ser factible tenint en compte les limitacions de producció de cada unitat i el fet que la participació en el mercat es consideri una dada inicial, de manera que

$$P_i^{min} \leq p_{i,t}^{Diari} \leq P_i^{max} \quad \forall i \in I, \forall t \in T \quad (3.5)$$

per tant, resta per definir la funció d'oferta pel Mercat Diari, la qual s'expressarà en funció de la variable  $p_{i,t}^{Diari}$ .

A continuació es defineix la funció d'oferta del Mercat Diari d'acord amb el les dues propostes plantejades tal i com s'exposa seguidament.

**Definició 3.1:** La funció d'oferta òptima per qualsevol unitat  $t$  i interval horari  $i$  que participi en el Mercat Diari considerant costos de producció de potència quadràtics limitant la potència a vendre en aquest mercat a  $p_{i,t}^{Diari}$  i restringint a  $[P_i^{min}, P_i^{max}]$  l'interval de producció s'expressa com

$$\lambda_{i,t}(p_{i,t}, p_{i,t}^{Diari}) = \begin{cases} 0 & \text{si } 0 \leq p_{i,t} \leq P_i^{min} \\ c_t^l + 2c_t^q p_{i,t} & \text{si } P_i^{min} < p_{i,t} \leq p_{i,t}^{Diari} \\ \bar{\lambda} & \text{si } p_{i,t}^{Diari} < p_{i,t} \leq P_i^{max} \end{cases} \quad (3.6)$$

on:

- $c_t^l$  és el coeficient que indica el cost de la generació de potència per una unitat generadora elèctrica  $t$  lineal,
- $c_t^q$  és el coeficient que indica el cost de la generació de potència per una unitat generadora elèctrica  $t$  quadràtic,
- $\bar{\lambda}$  és el preu instrumental 188,3 €.

I es representa en 3.1.

Per tant, l'anterior desenvolupament demostra la següent proposició:

**Proposició 3.1:** Sota les regles d'oferta del MIBEL, la funció d'oferta que maximitza el benefici del Mercat Diari de la unitat tèrmica  $t$ , en un interval horari  $i$  i associada a un valor  $p_{i,t}^{Diari}$  ve donada per l'expressió (3.6).

Així doncs, en funció del valor de la variable  $p_{i,t}$  que indica la potència respecte la potència màxima a ofertar al Mercat Diari  $p_{i,t}^{Diari}$  i les limitacions de producció de la pròpia unitat  $[P_i^{min}, P_i^{max}]$ , es defineix la funció d'oferta en tres trossos. Tot seguit s'explicita i raona la definició d'aquesta per cadascun dels tres trossos en què es segmenta el domini de la variable  $p_{i,t}$ .

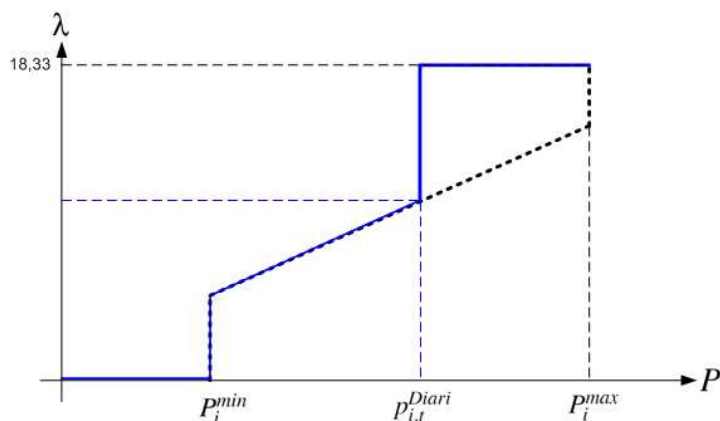


Figura 3.1: Funció d'oferta per al Mercat Diari.

En el primer d'aquests,  $[0, P_i^{min}]$ , la funció d'oferta es determina a preu zero. S'anomena oferta de venda instrumental, preu-acceptant o "preu zero", i ve imposada per la necessitat d'assegurar que la generació cassada de les unitats en funcionament mai serà inferior a la potència mínima de producció, per tant, és directa tenint en compte el propi funcionament del mercat elèctric i les restriccions tècniques imposades per a cada unitat.

El segon tram està definit en l'interval  $(P_i^{min}, P_i^{Diari}]$ . Tenint en compte que l'objectiu final de la modelització és maximitzar el benefici obtingut, derivant i igualant a zero l'expressió d'aquest descrit en (3.4) en funció de la potència  $p_{i,t}$  s'obté

$$B_i(p_{i,t})' = 0 \Leftrightarrow \lambda_{i,t} = c_i^l + 2c_i^q p_{i,t} \quad \forall i \in I, \forall t \in T \quad (3.7)$$

La segona derivada del qual és negativa. Per tant, el major guany ve donat quan es compleix la relació (3.7). És a dir, la recta representada 3.2 relaciona potència i preu tot maximitzant el benefici: a partir del preu fixat per un escenari s'obté directament la potència òptima a ser ofertada en aquest.

Per tant, la definició del segon tram és la restricció en l'interval  $(P_i^{min}, P_i^{Diari}]$  de l'expressió (3.7).

Per últim, la funció d'oferta també es determina en el tercer tram del domini  $p_{i,t}$ ,  $(P_i^{Diari}, P_i^{max})$ , en aquest cas pel valor constant  $\bar{\lambda} = 188,3 \text{ €/MWh}$ . Com en el primer tros, aquest és el preu màxim instrumental imposat en el mercat elèctric per tal de poder reservar part de la potència per mercats posteriors assegurant, així, que la potència cas-

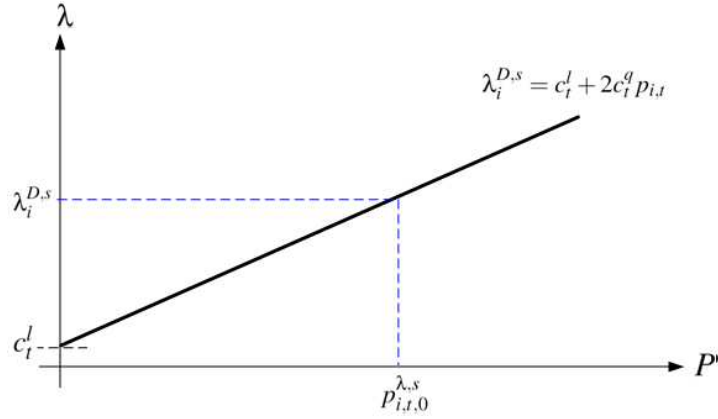


Figura 3.2: Recta potència - preu òptim.

sada en el mercat no sigui superior al valor màxim que es vol destinar en aquest.

Així doncs, amb el nou plantejament fixant un preu s'obté directament la potència que maximitza el guany mitjançant la recta de la figura 3.2, és a dir, fixant un escenari també es determina el valor de la potència més adequat per tal d'optimitzar els beneficis. Per tant, si es fixa un escenari  $\lambda_i^{D,s}$  la potència associada a aquest segons (3.7) ve determinada directament per l'expressió

$$P_{i,t,0}^{\lambda,s} = \frac{\lambda_i^{D,s} - c_t^l}{2c_t^q} \quad \forall i \in I, \forall t \in T, \forall s \in S \quad (3.8)$$

de manera que si es limita el seu valor tenint en compte la capacitat de producció de cada unitat, es defineix finalment la potència cassada com

$$P_{i,t}^{\lambda,s} = \begin{cases} P_i^{min} & \text{si } P_{i,t,0}^{\lambda,s} \leq P_i^{min} \\ \frac{\lambda_i^{D,s} - c_t^l}{2c_t^q} & \text{si } P_i^{min} < P_{i,t,0}^{\lambda,s} \leq P_i^{max} \\ P_i^{max} & \text{si } P_i^{max} < P_{i,t,0}^{\lambda,s} \end{cases} \quad \forall i \in I, \forall t \in T, \forall s \in S \quad (3.9)$$

$\forall i \in I, t \in T, s \in S$  que es representa en la figura 3.3.

D'aquesta manera, doncs, plantejar quina és la potència cassada per cada escenari donada la funció d'oferta òptima, pot tenir bàsicament dues respostes en funció de si

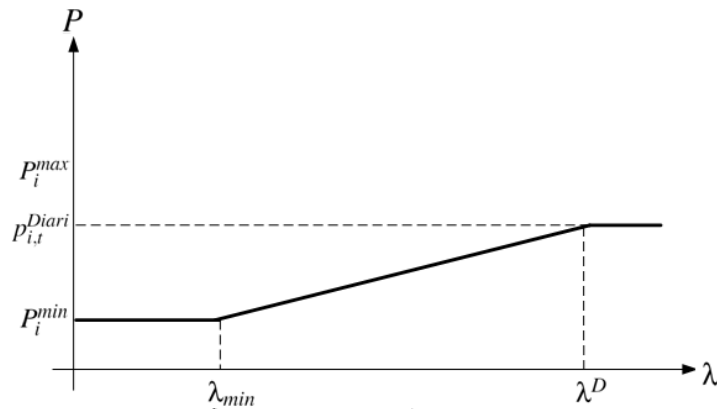


Figura 3.3: Potència associada a cada escenari.

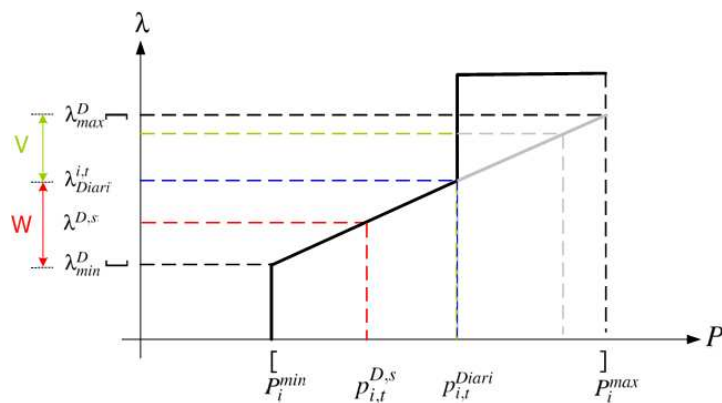


Figura 3.4: Partició recta potència preu - òptima segons potència màxima reservada pel Mercat Diari.

la potència associada a cada preu,  $P_{i,t}^{\lambda,s}$ , és major o menor a la potència màxima que es reserva pel Mercat Diari  $P_{i,t}^{Diari}$ . Per una banda, si és menor, la potència associada al preu de l'escenari continuarà sent vàlida i coherent amb els nous criteris; en cas contrari, la potència que caldrà associar a l'escenari corresponent serà precisament la màxima que es reserva pel Mercat Diari. A continuació, es representen els dos possibles conjunts d'escenaris en la figura 3.4 i el valor de la potència cassada segons la funció d'oferta presentada per cada escenari - preu fixat.

Per tant, en la nova modelització es redefineix com a  $p_{i,t}^{D,s}$  la potència cassada per la unitat  $t$ , en l'interval horari  $i$ , segons l'escenari  $s$  i en el Mercat Diari com

$$p_{i,t}^{D,s}(p_{i,t}^{Diari}, \lambda_i^{D,s}) = \begin{cases} P_{i,t}^{\lambda,s} & \text{si } p_{i,t}^{\lambda,s} \leq p_{i,t}^{Diari} \\ p_{i,t}^{Diari} & \text{si } p_{i,t}^{\lambda,s} > p_{i,t}^{Diari} \end{cases} \quad (3.10)$$

Per tant, segons l'argumentació plantejada la funció d'oferta resultant per la nova formulació resta en funció del valor de la variable que indica la potència màxima a reservar pel Mercat Diari per cada unitat  $t$  i hora  $i$   $p_{i,t}^{Diari}$ . Així doncs, la modelització que es presenta introdueix aquesta variable de primera etapa directament en la funció d'oferta, de manera que, per tot escenari  $s$ , tenint *a priori*  $p_{i,t}^{Diari}$  aquest s'integra en la definició de la oferta òptima, de manera que el valor cassat  $p_{i,t}^{D,s}$  pel mercat serà l'òptim. Aquest és el mode mitjançant el qual s'engloba la decisió de primera etapa en el conjunt de la modelització.

En conclusió, doncs, amb el nou plantejament on s'introdueixen costos de producció quadràtics en funció de la potència produïda, el preu d'un escenari determina directament la potència a ofertar òptima per tal de maximitzar el guany considerant la decisió *a priori* de la potència que es vol destinar al Mercat Diari. Aquest canvi comporta, a diferència del model de [11] la distinció entre potència ofertada i potència cassada, fet que implica reconstruir els conceptes definits en la formulació plantejada en el capítol anterior.

En conseqüència, l'adopció d'aquest nou enfocament comporta la definició de nous criteris i el desenvolupament d'una nova formulació pel mercat on s'aplica, el Mercat Diari. A continuació es desenvolupa i es descriu la formulació a partir de la qual s'estableix el nou plantejament en la funció d'oferta a determinar.

### 3.2 Formulació matemàtica

La introducció d'un plantejament nou en algun dels termes d'una formulació comporta canvis i modificacions en altres parts per tal de mantenir la coherència i la integritat en el model. A continuació es descriuen els canvis que comporta el fet d'introduir costos quadràtics seguint el plantejament descrit en l'apartat anterior.

D'acord amb el plantejament descrit, l'objectiu de la nova formulació és integrar costos quadràtics en la formulació del Mercat Diari i formular la funció d'oferta òptima. Aquest fet porta a crear noves variables i a discernir entre diferents conceptes respecte el que es vol obtenir com a resultat. Cal fer un particular esment al fet que en aquesta nova formulació es consideri  $P_{i,t}^{\lambda,s}$ , la potència associada al preu  $\lambda$  de l'escenari  $s$  de la unitat  $t$  expressada en (3.9) segons la funció d'oferta òptima, com una constant enlloc d'una variable, tal i com es definia en la formulació de l'article replicat [11].

La formulació es presenta

### 3.2.1 Funció objectiu

A continuació es presenta la determinació de la nova funció objectiu. A diferència de la formulació de l'article [11], aquesta es defineix a partir de la potència cassada pel Mercat Diari  $p_{i,t}^{D,s}$ . Per tant, la nova funció objectiu s'expressa com

$$\max \sum_{s \in S} \left[ \sum_{i \in I, t \in T} (\lambda_i^{D,s} t_i^{D,k} - c_i^l p_{i,t}^{D,s} - c_i^q (p_{i,t}^{D,s})^2) + \sum_{i \in I} (t_i^{A,s} \lambda_i^{A,s}) + \sum_{i \in I} (g_i^{B,s} - \sum_{t \in T} c_i^l p_{i,t}^{B,s}) \right] \pi_s \quad (3.11)$$

on:

- $c_i^l$  és el coeficient que indica el cost d'operar de cada unitat  $t$  lineal,
- $c_i^q$  és el coeficient que indica el cost d'operar de cada unitat  $t$  quadràtic.

Així doncs, la funció objectiu continua constant de tres termes corresponents al benefici que s'obté de cada mercat, sent aquest calculat a partir del benefici ponderat calculat per a cada escenari. En aquesta formulació, però, hi ha un terme quadràtic pel Mercat Diari corresponent als costos de producció que s'atribueixen a partir dels quals es desenvolupa el cos d'aquest nou plantejament del model multi-oferta.

### 3.2.2 Constriccions

A més a més de la pròpia funció objectiu, la nova formulació té canvis significatius en les constriccions imposades. A continuació s'exposen tant les noves constriccions imposades a partir de la nova formulació fruit de les particularitats que caracteritzen la nova formulació, com aquelles que només son lleugerament modificades o es que resten iguals en el nou model.

De les característiques del nou model, cal remarcar el fet de diferenciar entre potència ofertada  $P_{i,t}^{\lambda,s}$  definida en (3.9) i potència cassada  $p_{i,t}^{D,s}$  definida en (3.10). la potència cassada en cada escenari és funció del preu fixat per l'escenari i de la potència reservada al Mercat Diari, de manera que  $\forall i \in I, \forall t \in T, \forall s \in S$

$$p_{i,t}^{D,s}(p_{i,t}^{Diari}, \lambda_i^{D,s}) = \begin{cases} P_{i,t}^{\lambda,s} & \text{si } P_{i,t}^{\lambda,s} \leq p_{i,t}^{Diari} \\ p_{i,t}^{Diari} & \text{si } P_{i,t}^{\lambda,s} > p_{i,t}^{Diari} \end{cases} \quad (3.12)$$



on:

- $p_{i,t}^{Diari}$  és la variable que indica la potència màxima reservada per el Mercat Diari per la unitat  $t$  en l'interval horari  $i$
- $P_{i,t}^{\lambda,s}$  és el paràmetre corresponent a la potència òptima d'oferta per la unitat  $t$  fixat l'escenari  $s$  en l'interval horari  $i$  segons la definició (3.9).

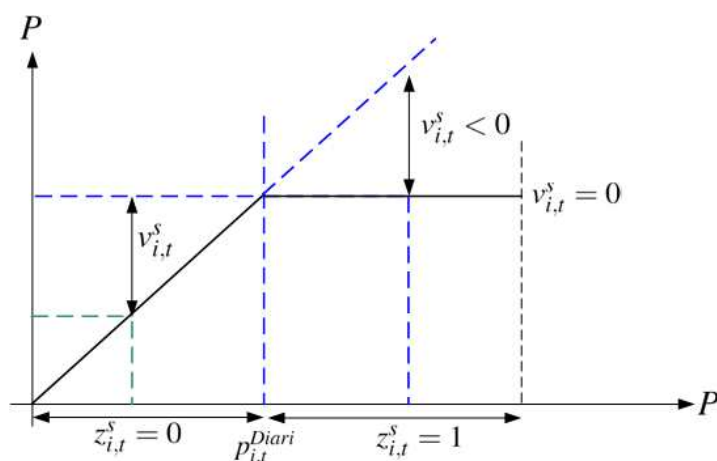


Figura 3.5: Formulació funció d'oferta.

L'expressió (3.12) és una relació no diferenciable que ha de ser transformada en un sistema equivalent de constriccions lineals abans de ser incorporada al model lineal mixt. Es defineixen dues variables:  $z_{i,t}^s$  binària com a indicadora de si la potència associada en un preu - escenari en un interval horari  $i$  i unitat  $t$  és inferior o superior a la potència reservada pel Mercat Diari  $p_{i,t}^{Diari}$ , prenent valor 0 i 1 respectivament; la variable  $v_{i,t}^s$  continua i positiva fitada per  $p_{i,t}^{Diari} - P_{i,t}^{\lambda,s}$ . En la figura 3.5 s'observa la relació entre les dues variables definides fixant una unitat  $t$ , un interval horari  $i$  i un escenari  $s$ . En aquest gràfic es pot observar la funció d'oferta resultant en el cas que  $p_{i,t}^{Diari}$  prengui per valor  $P_i^{min}$ ,  $P_i^{max}$  o un valor entremig. Així doncs, mitjançant el sistema (3.13) es defineix un conjunt de constriccions lineals i equivalent a la definició de la funció (3.12).

$$\left\{ \begin{array}{ll}
 p_{i,t}^{Diari} \leq P_{i,t}^{\lambda,s} z_{i,t}^s + M_{gran}(1 - z_{i,t}^s) \quad \forall i \in I, \forall t \in T, \forall s \in S & (a) \\
 P_{i,t}^{\lambda,s} (1 - z_{i,t}^s) \leq p_{i,t}^{Diari} - v_{i,t}^s \quad \forall i \in I, \forall t \in T, \forall s \in S & (b) \\
 0 \leq v_{i,t}^s \leq M_{gran}(1 - z_{i,t}^s) \quad \forall i \in I, \forall t \in T, \forall s \in S & (c) \\
 p_{i,t}^{D,s} \leq P_{i,t}^{\lambda,s} (1 - z_{i,t}^s) + M_{gran} z_{i,t}^s \quad \forall i \in I, \forall t \in T, \forall s \in S & (d) \\
 p_{i,t}^{D,s} = p_{i,t}^{Diari} - v_{i,t}^s \quad \forall i \in I, \forall t \in T, \forall s \in S & (e) \\
 z_{i,t}^s \in \{0, 1\}, v_{i,t}^s \geq 0 \quad \forall i \in I, \forall t \in T, \forall s \in S & (f)
 \end{array} \right. \quad (3.13)$$

En la següent proposició es demostra l'equivalència del sistema anterior versus la funció que defineix la potència cassada.

**Proposició 3.2:** *El sistema (3.13) i la funció (3.12) són equivalents, és a dir, per a qual-sevol parell  $(p_{i,t}^{Diari}, \lambda_i^{D,s})$  la solució del sistema per la potència cassada  $p_{i,t}^{D,s}$  compleix (3.8).*

*Demostració:* Donat un parell de valors  $(p_{i,t}^{Diari}, \lambda_i^{D,s})$  i, per tant,  $(p_{i,t}^{Diari}, P_{i,t}^{\lambda,s})$ , existeixen tres possibles situacions:

- $p_{i,t}^{Diari} < P_{i,t}^{\lambda,s}$
- $p_{i,t}^{Diari} > P_{i,t}^{\lambda,s}$
- $p_{i,t}^{Diari} = P_{i,t}^{\lambda,s}$

Analitzem a continuació les dues primeres possibilitats, ja que la tercera és directa a partir d'aquestes.

En el primer cas,  $p_{i,t}^{Diari} < P_{i,t}^{\lambda,s}$ , per tant, la variable binària  $z_{i,t}^s$  pren per valor 1: suposem que no, és a dir, que  $z_{i,t}^s = 0$ , aleshores, segons la constricció  $P_{i,t}^{\lambda,s}(1 - z_{i,t}^s) \leq p_{i,t}^{Diari} - v_{i,t}^s$  es tindria que  $\forall i \in I, \forall t \in T, \forall s \in S$

$$P_{i,t}^{\lambda,s} \leq p_{i,t}^{Diari} - v_{i,t}^s \Rightarrow P_{i,t}^{\lambda,s} + v_{i,t}^s \leq p_{i,t}^{Diari} \quad (3.14)$$

de manera que, si es té en compte que  $v_{i,t}^s \geq 0$ , aleshores  $P_{i,t}^{\lambda,s} \leq p_{i,t}^{Diari}$  i, per tant, contradicció.

Si  $z_{i,t}^s = 1$ , aleshores per (3.13c) es dedueix que  $v_{i,t}^s = 0$  i, mitjançant les dues constriccions (3.13b,3.13e) s'obté  $\forall i \in I, t \in T, s \in S$

$$\begin{cases} P_i^{\lambda,s}(1 - z_{i,t}^s) \leq p_{i,t}^{D,s} \Rightarrow P_i^{\lambda,s} \leq p_{i,t}^{D,s} \\ p_{i,t}^{D,s} = p_{i,t}^{Diari} - v_{i,t}^s \Rightarrow p_{i,t}^{D,s} \leq p_{i,t}^{Diari} + P_i^{\lambda,s} - p_{i,t}^{Diari} = P_i^{\lambda,s} \end{cases} \quad (3.15)$$

i, per tant,  $p_{i,t}^{D,s} = P_i^{\lambda,s}$ .

En el segon cas, on ( $p_{i,t}^{Diari} > P_i^{\lambda,s}$ ), mitjançant la constricció  $p_{i,t}^{Diari} z_{i,t}^s \leq p_{i,t}^{D,s}$  directament es fixa el valor de  $z_{i,t}^s$  a 0. Definit el valor d'aquesta variable, de les dues constriccions següents es dedueix que  $\forall i \in I, \forall t \in T, \forall s \in S$

$$\begin{cases} P_i^{\lambda,s}(1 - z_{i,t}^s) \leq p_{i,t}^{D,s} \Rightarrow 0 \leq p_{i,t}^{D,s} \\ p_{i,t}^{D,s} = p_{i,t}^{Diari} - v_{i,t}^s \Rightarrow p_{i,t}^{D,s} = p_{i,t}^{Diari} - 0 \end{cases} \quad (3.16)$$

de manera que  $p_{i,t}^{D,s} = p_{i,t}^{Diari}$ .

□

El fet d'integrar en la formulació la definició de la nova potència cassada  $p_{i,t}^{D,s}$  comporta, tal i com es pot observar, la definició de la variable que expressa la potència màxima a ofertar en el Mercat Diari  $p_{i,t}^{Diari}$ . Donat que la participació en aquest mercat es considera obligatòria, una dada inicial en la formulació, en la nova modelització també s'imposa

$$\begin{cases} P_i^{min} \leq p_{i,t}^{Diari} \quad \forall i \in I, \forall t \in T, \forall s \in S \\ p_{i,t}^{Diari} \leq P_i^{max} \quad \forall i \in I, \forall t \in T, \forall s \in S \end{cases} \quad (3.17)$$

A més a més de les noves constriccions a partir de les quals es modelitza el nou plantejament en l'adopció del model multi-oferta, cal continuar establint les restriccions tècniques necessàries per garantir la factibilitat dels resultats obtinguts. Així doncs, en el cas concret de les constriccions que expressen les capacitats màximes i mínimes a produir de cada unitat també cal que siguin modificades per tal de garantir la coherència amb la resta de la modelització.

Les constriccions que apareixien al model replicat en el capítol 2 referents a la màxima i mínima potència i els paràmetres de rampa que s'expressen a partir de la

potència encara que l'expressió continuï sent quasi bé la mateixa, cal tenir en compte que pel Mercat Diari es tracta de la potència cassada tal i com es defineix en el present capítol. Així doncs, per una banda, sota la premissa (3.1) les constriccions

$$\begin{cases} p_{i,t}^{D,s} + p_{i,t}^{B,s} + \frac{1}{2}p_{i,t}^{A,s} \leq P_t^{max} & \forall i \in I, \forall t \in T, \forall s \in S \\ p_{i,t}^{D,s} + p_{i,t}^{B,s} - \frac{1}{2}p_{i,t}^{A,s} \geq P_t^{min} & \forall i \in I, \forall t \in T, \forall s \in S \end{cases} \quad (3.18)$$

impliquen que les següent són redundants i es poden eliminar del model

$$\begin{cases} p_{i,t}^{D,s} + p_{i,t}^{B,s} \leq P_t^{max} & \forall i \in I, \forall t \in T, \forall s \in S \\ p_{i,t}^{D,s} + p_{i,t}^{B,s} \geq P_t^{min} & \forall i \in I, \forall t \in T, \forall s \in S \end{cases} \quad (3.19)$$

Per altra, a les constriccions de rampa és oportú introduir-hi la fluctuació de potència que implica la participació en el Mercat de Secundària, ja que sota (3.1) en aquesta nova modelització aquestes constriccions s'expressen en funció de la potència i les restriccions tècniques també han d'afectar al Mercat de Secundària tal i com s'indica a continuació.

$$\begin{cases} p_{i,t}^{D,s} + p_{i,t}^{B,s} + \frac{1}{2}p_{i,t}^{A,s} - (p_{i,(t-1)}^{D,s} + p_{i,(t-1)}^{B,s} + \frac{1}{2}p_{i,(t-1)}^{A,s}) \\ \leq (1 - on_{i,t}^s)R_i^{up} & \forall i \in I, \forall t \in T, \forall s \in S \\ p_{i,(t-1)}^{D,s} + p_{i,(t-1)}^{B,s} + \frac{1}{2}p_{i,(t-1)}^{A,s} - (p_{i,t}^{D,s} + p_{i,t}^{B,s} + \frac{1}{2}p_{i,t}^{A,s}) \\ \leq (1 - on_{i,t}^s)R_i^{down} & \forall i \in I, \forall t \in T, \forall s \in S \end{cases} \quad (3.20)$$

Així mateix, com a conseqüència de suposar (3.1) el benefici expressat en la funció objectiu calculat a partir de la variable  $t_i^{m,s}$  ha d'estar d'acord amb la nova consideració, de manera que la constricció que definia aquesta variable es modifica d'acord amb l'equivalència, resultant com

$$t_i^{m,s} = \sum_{t \in T} p_{i,t}^{m,s} \quad \forall i \in I, \forall s \in S, \forall m \in M \quad (3.21)$$

Anàlogament, la constricció que expressa la capacitat màxima a participar en el Mercat de Secundària s'expressa mitjançant la variable potència d'acord amb la definició i unitats del paràmetre  $P_t^A$  (MW), tal i com es mostra a continuació.

$$p_{i,t}^{D,s} \leq on_{i,t}^s P_t^A \quad \forall i \in I, \forall t \in T, \forall s \in S \quad (3.22)$$

En resum, doncs, per la nova modelització apareixen noves constriccions, d'altres resten modificades d'acord amb la nova definició de les variables que hi apareixen i, d'altres constriccions que apareixien en el model anterior s'exclouen. Les constriccions introduïdes de nou en aquest model són les citades en (3.13) i (3.17). Per altra banda, les constriccions modificades d'acord amb la nova premissa  $q_{i,t}^{m,s} = p_{i,t}^{m,s} \quad \forall i \in I, \forall t \in T, \forall s \in S, \forall m \in M$  són

$$\left\{ \begin{array}{l} p_{i,t}^{D,s} + p_{i,t}^{B,s} + \frac{1}{2} p_{i,t}^{A,s} \leq P_t^{max} \quad \forall i \in I, \forall t \in T, \forall s \in S \\ p_{i,t}^{D,s} + p_{i,t}^{B,s} - \frac{1}{2} p_{i,t}^{A,s} \geq P_t^{min} \quad \forall i \in I, \forall t \in T, \forall s \in S \\ p_{i,t}^{D,s} + p_{i,t}^{B,s} + \frac{1}{2} p_{i,t}^{A,s} - (p_{i,(t-1)}^{D,s} + p_{i,(t-1)}^{B,s} + \frac{1}{2} p_{i,(t-1)}^{A,s}) \\ \leq (1 - on_{i,t}^s) R_i^{up} \quad \forall i \in I, \forall t \in T, \forall s \in S \\ p_{i,(t-1)}^{D,s} + p_{i,(t-1)}^{B,s} + \frac{1}{2} p_{i,(t-1)}^{A,s} - (p_{i,t}^{D,s} + p_{i,t}^{B,s} + \frac{1}{2} p_{i,t}^{A,s}) \\ \leq (1 - on_{i,t}^s) R_i^{down} \quad \forall i \in I, \forall t \in T, \forall s \in S \\ t_i^{m,s} = \sum_{t \in T} p_{i,t}^{m,s} \quad \forall i \in I, \forall s \in S, \forall m \in M \\ p_{i,t}^{A,s} \leq on_{i,t}^s P_t^A \quad \forall i \in I, \forall t \in T, \forall s \in S \end{array} \right. \quad (3.23)$$

Les que resten tal i com apareixien al model implementat en la modelització presentada al l'article [11] són les que fan referència als beneficis en el Mercat Intradiari i la no-anticipació

$$\left\{ \begin{array}{l} g_i^{B,s} = t_i^{B,s} (\alpha_t^s + \beta_t^s t_i^{B,s}) \quad \forall i \in I, \forall s \in S \\ p_{i,t}^{A,s} = p_{i,t}^{A,s'} \quad \forall s, s' \in S | ((\lambda_i^{D,s}, \lambda_i^{A,s}) = (\lambda_i^{D,s'}, \lambda_i^{A,s'}) \forall i \in I), \forall t \in T \end{array} \right. \quad (3.24)$$

I, per tant, les constriccions que desapareixen motivades pel canvi en la concepció de la funció d'oferta i la nova implementació són les que asseguren que la solució obtinguda complís els requeriments necessaris per poder ser entesa com a funció d'oferta i les que apareixen com a redundants d'acord amb (3.1). Aquestes constriccions són les següents

$$\left\{ \begin{array}{l} p_{i,t}^{D,s} + p_{i,t}^{B,s} \leq P_t^{max} \quad \forall i \in I, \forall t \in T, \forall s \in S \\ p_{i,t}^{D,s} + p_{i,t}^{B,s} \geq P_t^{min} \quad \forall i \in I, \forall t \in T, \forall s \in S \\ q_{i,t}^{m,s} = \frac{1}{2}(p_{i,(t-1)}^{m,s} + p_{i,t}^{m,s}) \quad \forall i \in I, \forall t \in T, \forall s \in S, \forall m \in M \\ p_{i,t}^{D,s} - p_{i,t}^{D,s'} \leq 0 \quad \forall s, s' \in S | (O(\lambda_i^{D,s}) + 1 = O(\lambda_i^{D,s'})), \forall i \in I, \forall t \in T \\ p_{i,t}^{D,s} = p_{i,t}^{D,s'} \quad \forall s, s' \in S | (\lambda_i^{D,s} = \lambda_i^{D,s'} \forall i \in I), \forall t \in T \end{array} \right. \quad (3.25)$$

Així doncs, el nou plantejament de la modelització del Mercat Diari pel model multi-oferta comporta la definició de noves constriccions per tal de poder integrar les noves variables i la redefinició d'altres d'aspectes més tècnics per a cada unitat. en aquesta nova modelització, es continua fixant com a dada inicial la participació de totes les unitats en el Mercat Diari, però es redefineix el resultat obtingut com a funció d'oferta tot creant variables de primera etapa que permeten diferenciar entre potència cassada i potència ofertada.

### 3.2.3 Modelització final

En conclusió, tal i com s'ha descrit totes les constriccions són lineals. Tanmateix, la funció objectiu no s'expressa linealment respecte la potència cassada. Per tant, finalment es planteja un problema de programació no lineal entera mixt, la formulació final del qual resta:

$$\begin{aligned}
\max \quad & \sum_{s \in S} \left[ \sum_{i \in I, t \in T} (\lambda_i^{D,s} t_i^{D,k} - c_i^l p_{i,t}^{D,s} - c_i^q (p_{i,t}^{D,s})^2) + \sum_{i \in I} (t_i^{A,s} \lambda_i^{A,s}) + \sum_{i \in I} (g_i^{B,s} - \sum_{t \in T} c_t^l p_{i,t}^{B,s}) \right] \pi_s \\
\text{s.a.} \quad & \left\{ \begin{aligned}
& p_{i,t}^{Diari} \leq P_{i,t}^{\lambda,s} z_{i,t}^s + M_{gran}(1 - z_{i,t}^s) \quad \forall i \in I, \forall t \in T \\
& P_{i,t}^{\lambda,s} (1 - z_{i,t}^s) \leq p_{i,t}^{Diari} - v_{i,t}^s \quad \forall i \in I, \forall t \in T, \forall s \in S \\
& 0 \leq v_{i,t}^s \leq M_{gran}(1 - z_{i,t}^s) \quad \forall i \in I, \forall t \in T, \forall s \in S \\
& p_{i,t}^{D,s} \leq P_{i,t}^{\lambda,s} (1 - z_{i,t}^s) + M_{gran} z_{i,t}^s \quad \forall i \in I, \forall t \in T, \forall s \in S \\
& p_{i,t}^{D,s} = p_{i,t}^{Diari} - v_{i,t}^s \quad \forall i \in I, \forall t \in T, \forall s \in S \\
& p_i^{min} \leq p_{i,t}^{Diari} \leq p_i^{max} \quad \forall i \in I, \forall t \in T \\
& p_{i,t}^{D,s} + p_{i,t}^{B,s} + \frac{1}{2} p_{i,t}^{A,s} - (p_{i,(t-1)}^{D,s} + p_{i,(t-1)}^{B,s} + \frac{1}{2} p_{i,(t-1)}^{A,s}) \\
& \leq (1 - on_{i,t}^s) R_i^{up} \quad \forall i \in I, \forall t \in T, \forall s \in S \\
& p_{i,(t-1)}^{D,s} + p_{i,(t-1)}^{B,s} + \frac{1}{2} p_{i,(t-1)}^{A,s} - (p_{i,t}^{D,s} + p_{i,t}^{B,s} + \frac{1}{2} p_{i,t}^{A,s}) \\
& \leq (1 - on_{i,t}^s) R_i^{down} \quad \forall i \in I, \forall t \in T, \forall s \in S \\
& t_i^{m,s} = \sum_{t \in T} p_{i,t}^{m,s} \quad \forall i \in I, \forall s \in S, \forall m \in M \\
& p_{i,t}^{D,s} + p_{i,t}^{B,s} + \frac{1}{2} p_{i,t}^{A,s} \leq p_t^{max} \quad \forall i \in I, \forall t \in T, \forall s \in S \\
& p_{i,t}^{D,s} + p_{i,t}^{B,s} - \frac{1}{2} p_{i,t}^{A,s} \geq p_t^{min} \quad \forall i \in I, \forall t \in T, \forall s \in S \\
& p_{i,t}^{A,s} \leq on_{i,t}^s P_t^A \quad \forall i \in I, \forall t \in T, \forall s \in S \\
& g_i^{B,s} = t_i^{B,s} (\alpha_t^s + \beta_t^s t_i^{B,s}) \quad \forall i \in I, \forall s \in S \\
& p_{i,t}^{A,s} = p_{i,t}^{A,s'} \quad \forall s, s' \in S | ((\lambda_i^{D,s}, \lambda_i^{A,s}) = (\lambda_i^{D,s'}, \lambda_i^{A,s'})) \forall i \in I, \forall t \in T \\
& q_{i,t}^{m,s} \geq 0, p_{i,t}^{m,s} \geq 0, t_i^{m,s} \geq 0, t_{i,n}^{B,s} \geq 0, z_{i,t}^s \geq 0, v_{i,t}^s \geq 0, p_{i,t}^{Diari} \geq 0 \\
& \forall m \in M, \forall i \in I, \forall t \in T, \forall s \in S, \forall n \in B \\
& on_{i,t}^s, z_{i,t}^s \in \{0, 1\} \quad \forall i \in I, \forall t \in T, \forall s \in S
\end{aligned} \right.
\end{aligned}$$

### 3.3 Anàlisi dels resultats

Amb l'objectiu de poder valorar la millora proposada en el model d'oferta òptima, a continuació es presenten els resultats obtinguts en el nou model des de diversos punts de vista. En primer lloc, s'exposa la sortida obtinguda mitjançant el nou model a nivell computacional i econòmic, per tal de poder valorar la coherència en els resultats i el cost de resolució que comporta; en segon lloc, es realitza un exhaustiva comparació dels resultats obtinguts respecte el model replicat de l'article [11].

#### 3.3.1 Anàlisi computacional i econòmic

A continuació es realitza un estudi sobre el cost computacional del nou model implementat, així com de la coherència dels resultats a nivell econòmic que es presenten. En primer lloc s'analitzen els resultats a nivell econòmic per tal de poder realitzar l'ajust necessari sobre les dades mitjançant el qual aquestes puguin aportar-nos la informació que convé. En segon lloc es realitza un anàlisi sobre el temps i els recursos utilitzats per la resolució del model en els diversos jocs de dades en que s'ha executat. Per últim, s'estudia la millora obtinguda per haver utilitzat una metodologia estocàstica respecte la determinista.

Les execucions que aparèixen en aquest capítol s'han obtingut utilitzant com a resolutor AMPL+CPLEX 11.0, executant-se en 4 processadors AMD Opteron 2222 de 3 GHz i 32 Gb de memòria RAM.

##### 3.3.1.1 Econòmic

El model present s'ha executat amb les dades de les unitats generadores presents en les execucions del capítol anterior originals de l'article [11]. Tanmateix, en la formulació replicada s'estimaven els costos de producció de potència elèctrica de forma lineal, de manera que no es disposen dels coeficients reals per tal de poder expressar el cost de producció de forma quadràtica.

Així doncs, mitjançant la relació entre els coeficients lineals i quadràtics que es disposaven d'altres unitats i la construcció d'un *spline* mitjançant Matlab entre aquestes, s'han estimat els coeficients quadràtics de producció de les unitats generadores utilitzades.

D'aquesta manera, el cost de producció de potència per a cada unitat augmenta, motiu pel qual els resultats obtinguts de benefici global amb els preus de retribució disponibles són, en algunes ocasions, negatius. Aquest fet és degut a que el model proposat es considera fixat l'estat engegat/apagat de les unitats elèctriques. Aquesta



és una aproximació del problema real on, com a part de les variables del problema, s'inclouen variables binàries que representen la decisió de posar en marxa o apagar la producció de cada unitat. Aquest problema es coneix com el problema de ùnit commitment seria una extensió possible del model presentat. El fet d'obtenir pèrdues en alguns models s'interpreta com que, amb el patró de funcionament de les unitat i els escenaris de preus fixats, no és possible obtenir beneficis dels mercats elèctrics. Tenint en compte que l'objectiu de la nova formulació plantejada no és l'estudi de l'impacte en el benefici sinó la construcció de la funció d'oferta i la forma en que resulta aquesta, es decideix desplaçar positivament i de forma equivalent tots els escenaris per tal de poder fer més factible l'estudi sobre els resultats en la funció mencionada.

Per tant, donat que la majoria de les execucions tenen per objectiu l'estudi de la funció d'oferta resultant i no la comparació del resultat econòmic respecte la modelització presentada en el capítol anterior, es realitzaran amb el joc de dades modificades. En els casos on s'utilitzin es dades original se'n farà especial puntualització.

Tot i així, l'estructura dels arbres d'escenaris continua sent *fan*, de manera que la consideració o no de la constricció de no-anticipació pels escenaris del Mercat de Secundària no afecta als resultats.

### 3.3.1.2 Cost computacional

En primer lloc analitzem el temps d'execució comparativament entre les dades originals dels dies 7, 8 i 9 en la taula 3.1. Tal i com s'observa, el cost d'execució del model en les dades per dilluns és major que en la resta de casos. Les pèrdues obtingudes en dues execucions són conseqüència d'utilitzar les dades originals, tal i com es comenta en l'apartat anterior.

| COSTOS COMPUTACIONALS MODEL MILLORA 1 |                   |       |        |             |       |
|---------------------------------------|-------------------|-------|--------|-------------|-------|
| DIA                                   | BENEFICI TOTAL(€) | B&B   | MIP    | TEMPS EXEC. | GAP % |
| 7                                     | -19.665           | 8.841 | 40.321 | 186         | 2,22  |
| 8                                     | 180.305           | 0     | 17.261 | 2,08        | 0,40  |
| 9                                     | -134.873          | 0     | 9.387  | 1,32        | 0,47  |

Taula 3.1: Costos computacionals millora 1 amb dades originals del 7, 8 i 9 de juny del 2.004 (temps expressat en segons).

A continuació, en la taula 3.2, s'exposa el cost d'execució necessari per obtenir un GAP en la solució menor al 1% i al 5% respectivament per a les dades calculades en base el dia 7. Com es pot observar, l'exigència d'obtenir un GAP mínim del 0,5% es correspon a un temps i un nombre d'iteracions de símplex molt petit, tot i que lògicament superiors al cas d'exigir un GAP mínim del 1%.

| EXECUCIONS MODEL MILLORA 1 FIXANT GAP MÍNIM |                   |     |        |              |       |
|---|-------------------|-----|--------|--------------|-------|
| GAP FIXAT %                                 | BENEFICI TOTAL(€) | B&B | MIP    | TEMPS EXEC.) | GAP % |
| 1   | 152.146           | 0   | 19.457 | 1,44         | 0,73  |
| 0,5   | 152.146           | 0   | 20.973 | 2,85         | 0,49  |

Taula 3.2: Costos computacionals millora 1 fixant valors GAP mínims amb dades a dilluns 7 de juny 2.004 (*temps expressat en segons*).

Per últim, en la taula 3.3 es poden observar els resultats obtinguts fixant diversos temps màxim d'execució per tal de poder valorar la millora de la solució respecte el cost d'execució que presenta. Tal i com s'observa, no s'obté una millora rellevant ni en la solució trobada ni en el GAP d'aquesta en cap dels casos, de manera que la solució obtinguda amb un dels temps d'execució més petits es pot considerar correcta.

| EXECUCIONS MODEL MILLORA 1 FIXANT TEMPS |         |         |             |       |
|---|---------|---------|-------------|-------|
| BENEFICI TOTAL (€)                      | B&B     | MIP     | TEMPS EXEC. | GAP % |
| 152.235                                 | 600     | 23.257  | 30          | 0,40  |
| 152.397                                 | 1.568   | 26.037  | 60          | 0,28  |
| 152.402                                 | 2.411   | 28.608  | 120         | 0,28  |
| 152.401                                 | 9.001   | 50.204  | 300         | 0,27  |
| 152.412                                 | 29.201  | 120.668 | 600         | 0,26  |
| 152.411                                 | 41.609  | 164.836 | 1.200       | 0,26  |
| 152.411                                 | 108.431 | 398.052 | 2.400       | 0,26  |

Taula 3.3: Costos computacionals millora 1 fixant temps màxims d'execució amb dades a dilluns 7 de juny 2.004 (*temps expressat en segons*).

### 3.3.1.3 Cas determinista

El model implementat és un model de programació estocàstica. Per tal de poder valorar la millora que s'obté respecte el cas d'utilitzar la versió determinista es pot observar en la taula 3.4 els indicadors de programació estocàstica.

| INDICADORS ESTOCÀSTICS MODEL MILLORA 1. |          |          |      |
|---|----------|----------|------|
| DIA                                     | RP       | EEV      | VSS  |
| 7                                       | -19.665  | -31.977  | 0,38 |
| 8                                       | 180.305  | 159.732  | 0,12 |
| 9                                       | -134.873 | -154.935 | 0,13 |

Taula 3.4: Indicadors de programació estocàstica amb dades originals dels dies 7, 8 i 9 de juny 2.004 (*expressats en €*).

El valor RP és el valor que la funció objectiu pren en el model presentat de programació estocàstica sota l'arbre de possibles escenaris fixats. El valor EEV es computa mitjançant el mateix model però no a partir de les dades de l'arbre d'escenaris sinó que del valor resultant de calcular la mitjana ponderada als escenaris de l'arbre plantejat en el model estocàstic. Aquest valor indica, doncs, la solució òptima determinista. Per últim, en la taula presentada en 3.4 també es mostra l'indicador VSS el qual expressa la diferència entre RP i EEV.

Tal i com es pot observar, s'obté una solució més bona mitjançant el model estocàstic que en el determinista. Aquest fet es manté en línia amb el resultats que s'obtenien en el capítol anterior, verificant, així, l'avantatge que comporta emprar la programació estocàstica.

### 3.3.2 Anàlisi comparatiu: rèplica vs model millora 1

En el capítol present es construeix un nou model partint del presentat en primer lloc en l'article [11]. A continuació es realitzen diversos anàlisis per tal de poder valorar la diferència en els resultats obtinguts, tant respecte la funció d'oferta obtinguda com al volum econòmic de benefici global calculat. Per altra banda, també es porta a terme un estudi comparatiu de l'increment del cost computacional que el nou model comporta.

### 3.3.2.1 Coeficient quadràtic 0: linealitzem costos per poder comparar

En la nova formulació descrita basada en el concepte d'expressar els costos de producció quadràticament, s'introdueixen noves variables que permeten, per exemple, diferenciar el concepte de potència ofertada i potència cassada. Així doncs, en el cas que els costos es defineixin lineals en les dues formulacions, el resultat obtingut no té perquè ser el mateix. L'objectiu d'aquest apartat és realitzar una comparació dels resultats obtinguts en el model replicat i mitjançant la nova formulació fixant, en aquesta última, els costos quadràtics nuls.

Per tal de definir en la nova modelització els costos quadràtics nuls, cal redefinir la potència òptima cassada per cada escenari determinat explicitada en (3.5). Així doncs, considerant un cost de producció lineal, la funció de benefici global serà lineal respecte la potència  $i$ , per tant, els extrems relatius es trobaran en els extrems del domini d'aquesta, és a dir, la potència mínima o la potència màxima a produir de cada unitat, segons el sentit de la pendent de la recta que expressa aquest benefici. La funció d'oferta resultant, doncs, serà una funció esglaonada amb un graó d'alçada  $c_i^l$  amb abscisses  $[p_t^{min}, p_{i,t}^{Diari}]$ .

D'acord amb la nova potència cassada fixant els costos quadràtics com a nuls, al quadre 3.5 s'exposen els resultats obtinguts respecte els que s'obtenien en el model replicat en el capítol 2.

| COMPARATIVA DE RESULTATS ARTICLE VS MILLORA 1 |         |           |            |              |
|---|---------|-----------|------------|--------------|
| DIA   | ARTICLE | MILLORA 1 | DIFERÈNCIA | DIFERÈNCIA % |
| 7   | 194.841 | 193.200   | -1.641     | 0,84         |
| 8   | 413.434 | 414.010   | 576        | 0,13         |
| 9   | 88.139  | 89.748    | 1.609      | 1,79         |

Taula 3.5: Comparativa resultats article vs formulació millora 1 amb costos quadràtics nuls i dades originals pels dies 7, 8 i 9 de juny 2.004 (expressats en €).

Així doncs, s'observa com a nivell de benefici els resultats en ambdues modelitzacions no difereixen significativament, sense existir una tendència clara d'obtenir solucions més o menys altes a nivell de funció objectiu.

### 3.3.2.2 Mercats diferents al diari fixats a zero

Tenint en compte que la formulació presentada en aquest capítol modifica l'anterior en el cos del Mercat Diari, a continuació es du a terme una comparació dels resultats obtinguts

en aquest mercat en ambdues formulacions en el cas que els dos mercats posteriors no intervinguin en el model.

Així doncs, amb l'objectiu de poder analitzar el canvi obtingut en els resultats del mercat la formulació del qual ha estat modificada, s'estudia i compara la solució obtinguda amb la nova formulació respecte la replicada del *paper* [?] anul·lant la possibilitat de participar en els següents mercats. D'aquesta manera, es pretén aconseguir reflectir la diferència en la solució que s'obté només tenint en compte el mercat on s'aplica la proposta de millora.

Al quadre 3.6 es mostren els resultats obtinguts amb el model de l'article replica al capítol anterior fixant que els mercats posteriors són nuls i els resultats del nou model definint, a més a més d'anular els mercats posteriors, els costos quadràtics nuls.

| COMPARATIVA DE RESULTATS ARTICLE CONTRA MILLORA 1 |         |           |            |              |
|---|---------|-----------|------------|--------------|
| DIA   | PAPER   | MILLORA 1 | DIFERÈNCIA | DIFERÈNCIA % |
| 7   | 185.523 | 193.200   | 7.677      | 3,97         |
| 8   | 412.617 | 414.010   | 1.393      | 0,33         |
| 9   | 87.456  | 89.748    | 2.292      | 2,55         |

Taula 3.6: Comparativa resultats article vs formulació millora 1 sense Mercat de Secundària i Intradiari amb costos quadràtics nuls i dades originals pels dies 7, 8 i 9 de juny 2.004 (*expressats en €*).

Tal i com es pot observar, la diferència en import total obtinguda en ambdós models no és rellevant relativament. Tanmateix, es mostra un resultat lleugerament superior pel model presentat en aquest capítol. Tot i així, donat que perquè els resultats siguin comparables es defineixen els costos quadràtics a 0, amb tot el que això comporta descrit en l'apartat anterior, la base a partir de la qual es dedueix el plantejament de la nova formulació s'elimina. Comparativament amb els resultats obtinguts en l'apartat anterior on no s'eliminaven els mercats posteriors, es pot observar com tot i abans obtenir resultats similars en aquest cas es denota una major part del benefici obtingut en el Mercat Diari. Tot i així, les diferències obtingudes no són notoris a nivell econòmic.

### 3.3.2.3 Cost computacional

En el present anàlisi es pretén valorar i quantificar l'increment del cost computacional del nou model millora 1 respecte el presentat en l'article [11]. Així doncs, en la taula

3.7 es contrasten les sortides del model presentat en aquest capítol executat en la seva totalitat, és a dir, per a tots els mercats, i sota les mateixes dades respecte el presentat en el [?]. En la taula es fixa, en primer lloc, un valor GAP mínim del 1% i, en segon lloc, del 0,5%.

| COMPARATIVA DE COSTOS COMPUTACIONALS |           |       |         |             |       |
|--------------------------------------|-----------|-------|---------|-------------|-------|
| DIA                                  | MODEL     | B&B   | MIP     | TEMPS EXEC. | GAP % |
| 7                                    | Millora 1 | 0     | 19.457  | 1,44        | 0,73  |
|                                      | Rèplica   | 0     | 17.347  | 32          | 0,76  |
| 8                                    | Millora 1 | 0     | 17.261  | 1,99        | 0,40  |
|                                      | Rèplica   | 0     | 8.628   | 16          | 0,15  |
| 9                                    | Millora 1 | 0     | 9.387   | 1,33        | 0,47  |
|                                      | Rèplica   | 290   | 27.303  | 198         | 0,96  |
| 7                                    | Millora 1 | 0     | 20.973  | 2,85        | 0,49  |
|                                      | Rèplica   | 590   | 44.465  | 361         | 0,41  |
| 8                                    | Millora 1 | 0     | 17.261  | 1,99        | 0,40  |
|                                      | Rèplica   | 0     | 8.628   | 11          | 0,15  |
| 9                                    | Millora 1 | 0     | 9.387   | 1,33        | 0,47  |
|                                      | Rèplica   | 4.920 | 359.949 | 2.203       | 0,50  |

Taula 3.7: Comparació costos computacionals millora 1 vs model rèplica fixant valors GAP mínims amb dies 7, 8 i 9 del juny 2.004 (*temps expressat en segons*).

És rellevant l'avantatge qualitatiu que presenta el nou model respecte el presentat en el capítol anterior tenint en compte el cost d'execució a nivell general. Particularment es pot observar com el nombre d'iteracions símplex necessàries, el nombre de nodes explorats de l'algoritme B&B o el temps d'execució és menor, tenint més impacte aquesta diferència en les execucions més costoses, és a dir, en els resultats referents a l'exigència d'un valor GAP del 0,5%.

### 3.3.2.4 Comparació corbes oferta

La diferència principal entre les dues modelitzacions presentades és la construcció i definició de la funció d'oferta. Seguidament d'haver analitzat els resultats obtinguts en ambdós models respecte diversos punts de vista per tal de poder establir una analogia directa entre les solucions obtingudes, a continuació es compara la funció d'oferta

resultant.

Si bé en la modelització replicada es construïa la funció d'oferta a partir dels valors de potència ofertada de cada escenari, en la nova modelització es canvia totalment l'enfocament de la definició d'aquesta, tal i com durant el capítol s'ha argumentat. Així doncs, en 3.6 es representa la funció d'oferta obtinguda en el model replicat i en la modelització presentada en el present capítol per una unitat i un interval horari en concret.

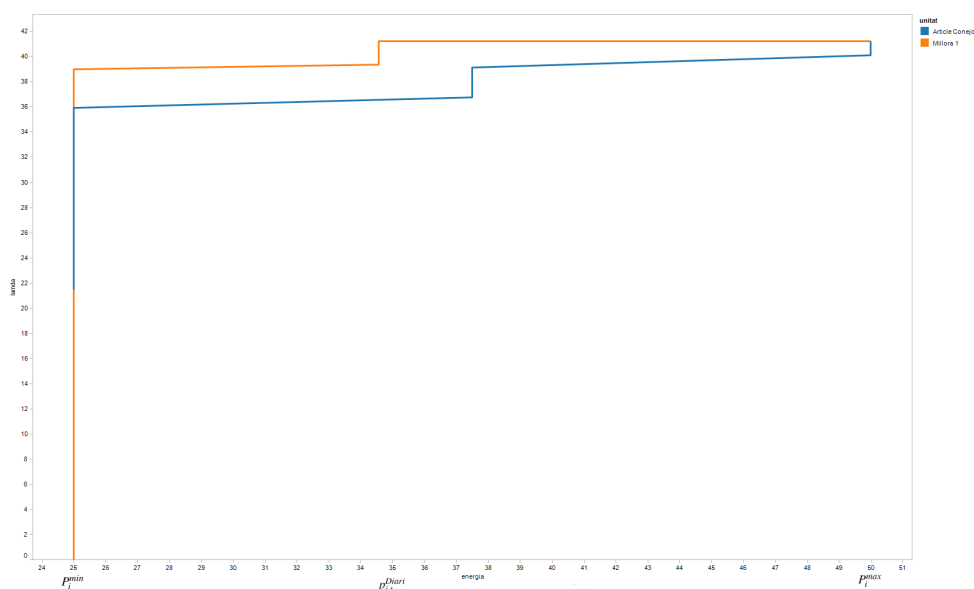


Figura 3.6: Formulació funció d'oferta per la unitat 5, hora 12 i dades originals a dimecres 9 de juny.

Tal i com es pot observar, en la funció d'oferta referent al model de l'article [11] no es reserva energia per als mercats posteriors. Aquest fet és conseqüència de la manera en que es defineix la funció d'oferta a partir dels parells escenaris - energia. Pels escenaris amb preus més alts, l'energia ofertada serà la màxima possible. Per aquests escenaris on el preu és més alt, oferir tota la potència presenta un guany superior a reservar energia pels mercats posteriors.

Considerant la variable de primera etapa  $i$ , per tant, independent dels escenaris,  $p_{i,t}^{Diari}$  s'assegura reservar més energia per als mercats posteriors, fet que es veu per la pròpia definició d'aquest i pels preus més alts oferts en funció de la mateixa energia. Tanmateix, el que la modelització s'optimitza és l'esperança de guany respecte tots els escenaris. Per

tant, i tenint en compte que el valor que pren  $p_{i,t}^{Diari}$  és menor a  $P_t^{max}$ , la reserva d'energia per als mercats posteriors és necessària per tal de maximitzar els beneficis, donat que si l'òptim fos oferir tota l'energia al Mercat Diari, la variable  $p_{i,t}^{Diari}$  seria justament el valor màxim.

Així doncs, l'energia ofertada mitjançant la nova funció definida en la modelització present és ofertada amb preus més alts que en el cas de l'article ??, reservant-se més energia per als mercats posteriors fet pel que es dona més importància al guany que es pot aconseguir en aquests.

### 3.4 Conclusions i possibles millores

Així doncs, en la nova modelització presentada es planteja un problema quadràtic amb restriccions lineals mixtes. Aquest canvi respecte la linealitat en la formulació plantejada a l'article [11] es dona com a conseqüència de no expressar els costos de producció d'energia mitjançant una aproximació lineal, sinó que quadràticament.

Anàlogament, en la nova formulació estocàstica es defineixen, en contrast del model presentat en el capítol 2, variables de primera etapa i, per tant, variables que no depenen dels escenaris. Aquestes representen la decisió de determinar, *a priori*, la quantitat d'energia que com a màxim es vol destinar al Mercat Diari.

De la mateixa manera, la nova funció d'oferta òptima continua presentada en la modelització construïda en aquest capítol es defineix, conceptualment, de forma radicalment diferent a l'anterior. La funció d'oferta òptima no es construeix a partir de les parelles escenari - energia com en la formulació del capítol 2, sinó que es fa a partir de la variable definida de primera etapa de forma continua. Així doncs, la funció d'oferta resultant és qualitativament més valorable.

A nivell del cost que la nova formulació comporta, s'estudia a nivell econòmic i a nivell computacional. En primer lloc, cal esmenar que econòmicament els resultats són equivalents sense obtenir un avantatge significatiu, sempre que, lògicament, en la comparació no es tingui en compte la part del terme quadràtic que s'afegeix al càlcul dels cost de producció de potència a la funció objectiu. Per altra banda, computacionalment el model no es pot considerar costós donat que s'obtenen valors GAP baixos en temps d'execució petits. Així mateix, comparativament parlant respecte el model presentat en l'article [?], s'observa com el temps d'execució necessari fixant en ambdós models els mateixos límits per al paràmetre GAP són considerablement menors per al nou model.

A nivell de les funcions d'oferta definides per a tots dos models, s'observa com en el model presentat en el capítol present es dona més importància als mercats posteriors al Mercat Diari, fet conseqüència directa de la definició d'una variable de primera etapa



que indica la màxima potència a oferir al primer mercat. En els resultats s'observa com el valor que pren aquesta variable resultant de la optimització no és la potència màxima (en el cas representat és quasi el 50% del rang de potència en que pot variar) de manera que, respecte l'objectiu de maximitzar els beneficis, la reserva d'aquesta potència és necessària.

Per tant i, en conclusió, la nova modelització presentada és competitiva amb la descrita en el capítol 2, tant a nivell de cost computacional com en la pròpia definició de la funció d'oferta.

Tanmateix, i tot i la millora que el nou model aconsegueix, es considera que la definició de la funció d'oferta és important de ser millorada d'acord amb el compliment de les exigències de MIBEL. El requeriments del Mercat Elèctric Ibèric marquen i exigeixen la presentació d'aquesta funció no de forma continua, sinó de forma discreta com a parells preu-energia. El tractament i estudi d'aquesta consideració es realitza en el capítol següent.

## Capítol 4

# Millora 2: Model esglaonat de funció d'oferta

### 4.1 Platejament

En els requeriments marcats pel sistema elèctric espanyol respecte les característiques d'una funció d'oferta es fixa que aquesta funció pot estar composta per, com a màxim, deu parells preu-energia, és a dir, una funció d'oferta es pot definir com una funció esglaonada fixant fins a 10 trams.

En conseqüència, es planteja la possibilitat d'introduir el requeriment dins de la pròpia formulació del model d'oferta òptima, fixant com a objectiu l'estudi de la repercussió que aquesta limitació pugui tenir.

D'aquesta manera, el nou objectiu es centra en poder determinar, de forma òptima, els parells en què regulatòriament cal que es defineixi la funció d'oferta, entenent com a tal, la maximització dels beneficis. És a dir, definir la funció d'oferta que es presenta finalment a partir de la pròpia optimització.

Tal i com es mostra en la figura 4.1, la nova funció d'oferta objectiu a obtenir és una *step function*. Així doncs, aquesta proposta es tradueix, dins el marc de la formulació presentada en l'apartat de la millora1, en la definició de com a màxim 10 trams en la recta que ens relaciona preu i potència òptima a partir de la qual, en el capítol anterior, es construïa la funció d'oferta. Equivalentment, doncs, definir els parell preu-potència equival a determinar la potència lliandar de cada graó, és a dir, la funció d'oferta. Per tant, l'objectiu recau en cercar els extrems de cada *step* dins el tram de la recta òptima preu-potència a partir de la qual es determina la funció d'oferta, és a dir, el valor  $t_2$ ,  $t_3$ , ... representat en la figura citada.

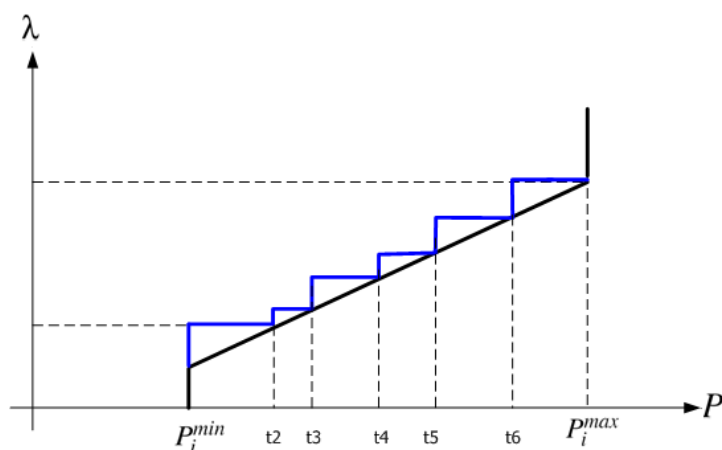


Figura 4.1: Funció d'oferta òptima esglaonada.

El fet de modificar la funció d'oferta final té com a conseqüència principal la variació de la potència que entenem com a cassada sota cada escenari  $s$ . Així doncs, donat que la funció d'oferta final resultant de la nova modelització serà esglaonada, caldrà definir de nou variables que indiquin la potència cassada d'acord amb la nova funció 4.2.

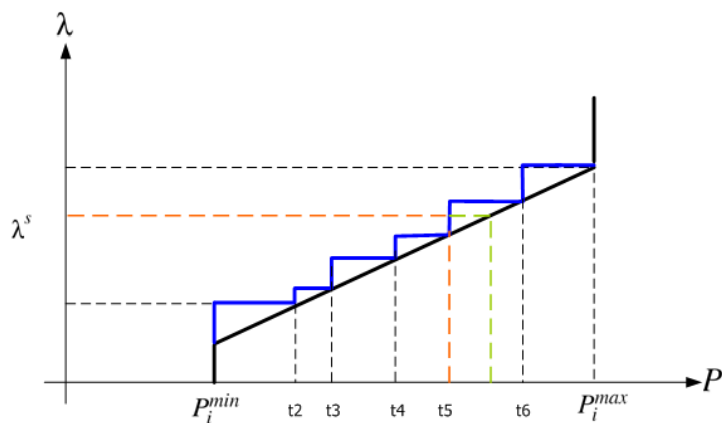


Figura 4.2: Funció d'oferta òptima esglaonada amb potència cassada fixat escenari.

Tanmateix, la construcció i conseqüent introducció de la nova funció d'oferta, es podria enfocar de forma integrada en la modelització o, per contra, de forma separable. El primer cas es centra en la obtenció de la funció d'oferta esglaonada a partir del propi

model que ens determina la potència màxima a ofertar en el Mercat Diari  $p_{i,t}^{Diari}$  alhora que la resta de variables referents al mateix mercat i als dos posteriors. El segon cas consisteix en resoldre un segon problema d'optimització a partir de la solució obtinguda en el model multi-oferta plantejat en el capítol 3, o sigui, determinar la funció esglaonada d'oferta a partir de la funció d'oferta ja determinada mitjançant la resolució del primer model. Mitjançant la formulació dels dos models es podrà valorar la importància que tingui la definició dels graons dins el propi model multi-mercat o, per contra, la no notorietat d'aquesta.

A continuació es defineixen, construeixen i implementen les dues possibilitats per, posteriorment, avaluar-ne els resultats.

## 4.2 Formulació integrada

En el present apartat es descriu i analitza la modelització fruit de la integració, en el model multi-oferta tractat en capítols anteriors, de la definició de la funció d'oferta òptima de forma esglaonada. En primer lloc es tracta la nova funció objectiu, integrant de noves variables coherents amb la nova formulació. En segon lloc es descriuen les constriccions creades així com les que es modifiquen per tal de que el conjunt de la modelització sigui coherent.

### 4.2.1 Funció objectiu

Anàlogament a les modelitzacions anteriors, la funció objectiu està formada per tres termes que expressen el benefici obtingut en la participació de cada mercat. Així doncs, en la nova definició de la funció d'oferta esglaonada, només caldrà determinar la nova potència cassada per cada escenari per tal de poder determinar el valor jaquest profit ja que el guany en la venda d'aquesta potència i, a la vegada, el cost de la producció d'aquesta són definibles a partir dels coeficients pels quals es caracteritzen. Així doncs, la funció objectiu de la nova formulació resta:

$$\begin{aligned} \max \sum_{i,t,s} [\lambda_t^{D,s} p_{i,t}^{D,s} - c_t^l p_{i,t}^{D,s} - c_t^q (p_{i,t}^{D,s})^2] \pi^s + \sum_s [\sum_t t_i^{A,k} \lambda_t^{A,s}] \pi^s \\ + \sum_s [\sum_t (g_i^{B,s} - \sum_i c_t^l p_{i,t}^{B,s})] \pi^s \end{aligned} \quad (4.1)$$

on:

- $p_{i,t}^{D,s}$  és la variable que indica la potència referent a la potència cassada segons la nova definició per la unitat  $t$ , l'interval horari  $i$  i l'escenari  $s$  segons la nova funció d'oferta esglaonada,
- $c_t^l$  és el coeficient lineal del cost de producció de la unitat  $t$ ,
- $c_t^q$  és el coeficient quadràtic del cost de producció de la unitat  $t$ ,
- $g_i^{B,s}$  és el benefici/retorn en la hora  $i$  i escenari  $s$  del Mercat Intradiari (€/MWh),
- $p_{i,t}^{B,s}$  és la variable que indica la potència produïda en la unitat  $t$  en la hora  $i$  i escenari  $s$  del Mercat Intradiari (MWh),
- $t_i^{A,s}$  és la variable que indica el total de la potència produïda per totes les unitats en la hora  $i$  i escenari  $s$  del Mercat Diari (MWh).

Per tal de poder obtenir el valor de la variable  $p_{i,t}^{D,s}$  respecte el valor de la potència cassada d'acord amb el nou plantejament d'aquesta, es defineixen tot un conjunt de constriccions que es descriuen a continuació.

#### 4.2.2 Constriccions

Amb l'objectiu de definir i construir la nova funció d'oferta, seguidament es determinen les variables que es creen per tal de que el càlcul d'aquesta sigui factible.

Com es pot observar en la figura 4.1, només cal fixar els graons respecte la potència per tal de definir la nova funció d'oferta a trossos -com es representa en la línia pintada de blau-, és a dir, el valor  $t_2, t_3, \dots$ . Així doncs, per cada funció d'oferta caldrà definir variables *trams* per determinar els llimdars de cada *step* respecte la potència, l'eix de les abscisses en les representacions 4.2. Aquestes variables seran diferents per a cada funció d'oferta, però com aquestes, no hauran de dependre dels escenaris, és a dir, seran variables de primera etapa.

En conseqüència doncs, es defineixen les variables  $tram_{i,t}$  per cada hora  $i \in I$  i cada unitat  $t \in T$ , independentment dels escenaris, corresponents als valors de potència que determinen cada graó, sent aquestes acotades per una banda, per la potència mínima tècnica de cada unitat  $i$ , per l'altra, per la potència que es reserva pel Mercat Diari  $p_{i,t}^{Diari}$ . Per tant, si es fixa que la funció d'oferta es defineixi per  $N$  graons, el primer i últim graó queden definits com

$$\begin{aligned} tram_{i,t}^1 &= P_i^{min} \quad \forall i \in I, \forall t \in T \\ tram_{i,t}^N &= P_i^{max} \quad \forall i \in I, \forall t \in T \end{aligned} \tag{4.2}$$

Tanmateix, el penúltim graó, que quedarà ofertat al preu instrumental de  $\bar{\lambda} = 188,3\text{€}$  també estarà definit pel valor que prengui la variable  $p_{i,t}^{Diari}$ , és a dir,

$$tram_{i,t}^{N-1} = p_{i,t}^{Diari} \quad \forall i \in I, \forall t \in T \quad (4.3)$$

A més a més d'aquestes, es declaren variables binàries  $w_{i,t}^{s,n}$ , on  $n \in N$  sent  $N$  el conjunt amb el número màxim de graons amb que es vol definir una funció d'oferta. L'objectiu d'aquestes variables es indicar, donat el preu  $\lambda_i^{D,s}$  fixat d'un escenari, entre quins dos trams es situa la potència d'oferta òptima  $P_{i,t}^{\lambda,s}$  corresponent a aquest preu per la recta preu-potència, és a dir, si  $P_{i,t}^{\lambda,s} \in [tram_{i,t}^n, tram_{i,t}^{n+1}]$  aleshores la variable  $w_{i,t}^{s,n}$  prendrà com a valor 1 (figura 4.3).

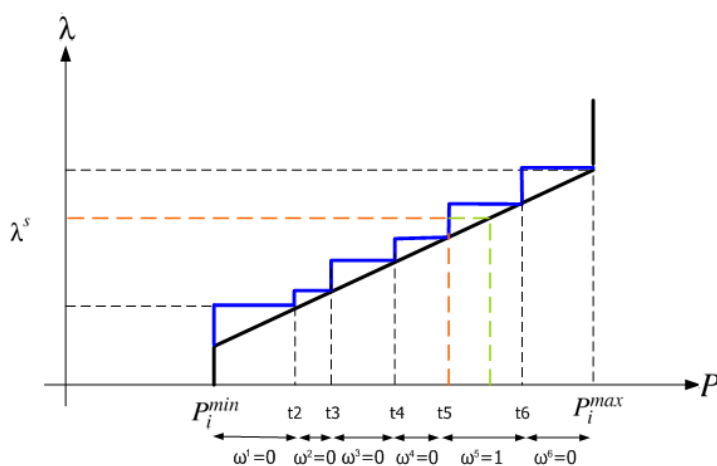


Figura 4.3: Funció d'oferta òptima esglaonada amb potència cassada fixat escenari i variable  $w$ .

Per tant, es fixaran les següents constriccions:

$$\left\{ \begin{array}{l} tram_{i,t}^n \leq tram_{i,t}^{(n+1)} \quad \forall i \in I, \forall t \in T, \forall s \in S, \forall n \in N \\ tram_{i,t}^n \leq P_{i,t}^{\lambda,s} w_{i,t}^{s,n} + M(1 - w_{i,t}^{s,n}) \quad \forall i \in I, \forall t \in T, \forall s \in S, \forall n \in N \\ P_{i,t}^{\lambda,s} w_{i,t}^{s,n} \leq tram_{i,t}^{n+1} \quad \forall i \in I, \forall t \in T, \forall s \in S, \forall n \in N \\ \sum_{n \in T} w_{i,t}^{s,n} = 1 \quad \forall i \in I, \forall t \in T, \forall s \in S, \forall n \in N \end{array} \right. \quad (4.4)$$

El pas següent a la construcció de les variables que definiran la funció d'oferta a trossos és definir la potència que es cassaria segons aquesta nova funció per a cada escenari. Prèviament, en la modelització cal introduir les variables  $prof_{i,t}^{s,n}$ .

Aquesta variable es definirà segons

$$prof_{i,t}^{s,n} = w_{i,t}^{s,n} tram_{i,t}^n \quad \forall i \in I, \forall t \in T, \forall s \in S, \forall n \in N \quad (4.5)$$

és a dir, expressa el valor de la potència que es cassaria en el cas que l'escenari  $s$  es trobi entre el tram  $n$  i  $n + 1$  o pren el valor 0 en cas contrari.

Tanmateix, la introducció d'aquesta variable en la formulació no és factible segons l'expressió (4.5) donat que l'expressió no seria lineal. A continuació es presenta un conjunt de constriccions creades amb l'objectiu de determinar (4.5) linealment. Per tal de poder-les construir s'ha definit la variable continua i positiva  $u_{i,t}^{s,n}$  com a auxiliar.

$$\left\{ \begin{array}{l} u_{i,t}^{s,n} \leq tram_{i,t}^{(n)} \quad \forall i \in I, \forall t \in T, \forall n \in N \quad (a) \\ tram_{i,t}^n - u_{i,t}^{s,n} = prof_{i,t}^{s,n} \quad \forall i \in I, \forall t \in T, \forall s \in S, \forall n \in N \quad (b) \\ prof_{i,t}^{s,n} \leq w_{i,t}^{s,n} M_{gran3} \quad \forall i \in I, \forall t \in T, \forall s \in S, \forall n \in N \quad (c) \\ u_{i,t}^{s,n} \leq (1 - w_{i,t}^{s,n}) M_{gran2} \quad \forall i \in I, \forall t \in T, \forall s \in S, \forall n \in N \quad (d) \end{array} \right. \quad (4.6)$$

En la següent proposició es demostra l'equivalència del sistema anterior versus la definició de la variable  $prof_{i,t}^{s,n}$  en (4.5).

**Proposició 3.2:** El sistema (4.6) i la definició (4.5) són equivalents, és a dir, per a qual-sevol escenari preu  $\lambda_i^{D,s}$  fixat tal que  $tram_{i,t}^n < P_{i,t}^{\lambda,s} < tram_{i,t}^{n+1}$  per algun  $n \in N$ , el valor que pren la variable  $prof_{i,t}^{s,n}$  com a solució del sistema és el que obtindria mitjançant la definició (4.5).

*Demostració:* Donat un valor  $\lambda_i^{D,s}$ , i per tant,  $P_{i,t}^{\lambda,s}$  tal que:

$$\bullet \quad tram_{i,t}^n < P_{i,t}^{\lambda,s} < tram_{i,t}^{n+1} \quad \text{per algun } n \in N$$

volem veure que el valor que pren  $prof_{i,t}^{s,n}$  com a solució de (4.6) és el que mitjançant (4.5) i (4.4) se li assignaria, és a dir,  $prof_{i,t}^{s,n} = tram_{i,t}^n$ .

Sigui  $n_i \in N$  tal que  $tram_{i,t}^{n_i} < P_{i,t}^{\lambda,s} < tram_{i,t}^{n_i+1}$ . Per tant,

$$\left\{ \begin{array}{l} w_{i,t}^{s,n_i} = 1 \quad (a) \\ w_{i,t}^{s,n} = 0 \quad \forall n \neq n_i, n \in N \quad (b) \end{array} \right. \quad (4.7)$$

Considerem (4.7b): directament de (4.6c) s'obté que  $prof_{i,t}^{s,n} = 0$  tal i com volíem veure, i la variable auxiliar  $u_{i,t}^{s,n}$  pren per valor  $tram_{i,t}^{(n+1)}$  com se'n desprèn de (4.6a, 4.6.b). En cas contrari, és a dir, considerem el cas (4.7a), és a dir, que  $w_{i,t}^{s,n_i} = 1$ , aleshores per (4.6d) i (4.6b) obtenim el valor que li correspon segons la definició (4.55) tal i com es volia arribar:

$$\left. \begin{array}{l} tram_{i,t}^{n_i} - u_{i,t}^{s,n_i} = prof_{i,t}^{s,n_i} \\ u_{i,t}^{s,n_i} \leq (1 - w_{i,t}^{s,n_i})M_{gran2} \Rightarrow u_{i,t}^{s,n_i} \leq 0 \end{array} \right\} \Rightarrow tram_{i,t}^{n_i} = prof_{i,t}^{s,n_i} \quad (4.8)$$

□

Un cop definida la variable  $prof_{i,t}^{s,n}$ , la potència cassada per a cada funció d'oferta per a cada escenari  $p_{i,t}^{D,s}$  es pot expressar directament com

$$\sum_{n \in N} prof_{i,t}^{s,n} = p_{i,t}^{D,s} \quad \forall i \in I, \forall t \in T, \forall s \in S \quad (4.9)$$

D'aquesta manera, per a cada unitat  $t$  i interval horari  $i$  s'obté la potència cassada segons la *step function* per a cada escenari  $s$  fixat.

El fet de modificar la potència cassada a ofertar implica modificar o redefinir algunes restriccions tècniques. Així doncs, en aquesta nova modelització caldrà continuar exigint les següents constriccions però entenent que  $p_{i,t}^{D,s}$  fa referència a la nova modelització.



$$\left\{ \begin{array}{l}
p_{i,t}^{D,s} + p_{i,t}^{B,s} + \frac{1}{2}p_{i,t}^{A,s} \leq P_t^{max} \quad \forall i \in I, \forall t \in T, \forall s \in S \\
p_{i,t}^{D,s} + p_{i,t}^{B,s} - \frac{1}{2}p_{i,t}^{A,s} \geq P_t^{min} \quad \forall i \in I, \forall t \in T, \forall s \in S \\
p_{i,t}^{D,s} + p_{i,t}^{B,s} + \frac{1}{2}p_{i,t}^{A,s} - (p_{i,(t-1)}^{D,s} + p_{i,(t-1)}^{B,s} + \frac{1}{2}p_{i,(t-1)}^{A,s}) \\
\leq (1 - on_{i,t}^s)R_i^{up} \quad \forall i \in I, \forall t \in T, \forall s \in S \\
p_{i,(t-1)}^{D,s} + p_{i,(t-1)}^{B,s} + \frac{1}{2}p_{i,(t-1)}^{A,s} - (p_{i,t}^{D,s} + p_{i,t}^{B,s} + \frac{1}{2}p_{i,t}^{A,s}) \\
\leq (1 - on_{i,t}^s)R_i^{down} \quad \forall i \in I, \forall t \in T, \forall s \in S \\
p_{i,t}^{D,s} \leq on_{i,t}^s P_t^A \quad \forall i \in I, \forall t \in T, \forall s \in S \\
p_{i,t}^{B,s} \leq on_{i,t}^s P_t^A \quad \forall i \in I, \forall t \in T, \forall s \in S \\
t_i^{m,s} = \sum_{t \in T} p_{i,t}^{m,s} \quad \forall i \in I, \forall s \in S, \forall m \in M
\end{array} \right. \quad (4.10)$$

Així doncs, les constriccions introduïdes de nou en aquesta millora són

$$\left\{ \begin{array}{l}
tram_{i,t}^n \leq tram_{i,t}^{(n+1)} \quad \forall i \in I, \forall t \in T, \forall s \in S, \forall n \in N \\
tram_{i,t}^n \leq P_{i,t}^{\lambda,s} w_{i,t}^{s,n} + M(1 - w_{i,t}^{s,n}) \quad \forall i \in I, \forall t \in T, \forall s \in S \\
P_{i,t}^{\lambda,s} w_{i,t}^{s,n} \leq tram_{i,t}^n \quad \forall i \in I, \forall t \in T, \forall s \in S \\
\sum_{n \in N} w_{i,t}^{s,n} = 1 \quad \forall i \in I, \forall t \in T, \forall s \in S \\
u_{i,t}^{s,n} \leq tram_{i,t}^n \quad \forall i \in I, \forall t \in T, \forall n \in N \\
tram_{i,t}^n - u_{i,t}^{s,n} = prof_{i,t}^{s,n} \quad \forall i \in I, \forall t \in T, \forall s \in S, \forall n \in N \\
prof_{i,t}^{s,n} \leq w_{i,t}^{s,n} M_{gran3} \quad \forall i \in I, \forall t \in T, \forall s \in S, \forall n \in N \\
u_{i,t}^{s,n} \leq (1 - w_{i,t}^{s,n}) M_{gran2} \quad \forall i \in I, \forall t \in T, \forall s \in S, \forall n \in N \\
\sum_{n \in N} prof_{i,t}^{s,n} = p_{i,t}^{D,s} \quad \forall i \in I, \forall t \in T, \forall s \in S, \forall n \in N
\end{array} \right. \quad (4.11)$$

Per altra banda, les modificades d'acord amb la redefinició d'algunes variables són

$$\left\{ \begin{array}{l} p_{i,t}^{D,s} + p_{i,t}^{B,s} + \frac{1}{2}p_{i,t}^{A,s} \leq P_t^{max} \quad \forall i \in I, \forall t \in T, \forall s \in S \\ p_{i,t}^{D,s} + p_{i,t}^{B,s} - \frac{1}{2}p_{i,t}^{A,s} \geq P_t^{min} \quad \forall i \in I, \forall t \in T, \forall s \in S \\ p_{i,t}^{D,s} + p_{i,t}^{B,s} + \frac{1}{2}p_{i,t}^{A,s} - (p_{i,(t-1)}^{D,s} + p_{i,(t-1)}^{B,s} + \frac{1}{2}p_{i,(t-1)}^{A,s}) \\ \leq (1 - on_{i,t}^s)R_i^{up} \quad \forall i \in I, \forall t \in T, \forall s \in S \\ p_{i,(t-1)}^{D,s} + p_{i,(t-1)}^{B,s} + \frac{1}{2}p_{i,(t-1)}^{A,s} - (p_{i,t}^{D,s} + p_{i,t}^{B,s} + \frac{1}{2}p_{i,t}^{A,s}) \\ \leq (1 - on_{i,t}^s)R_i^{down} \quad \forall i \in I, \forall t \in T, \forall s \in S \\ p_{i,t}^{A,s} \leq on_{i,t}^s P_t^A \quad \forall i \in I, \forall t \in T, \forall s \in S \\ t_i^{m,s} = \sum_{t \in T} p_{i,t}^{m,s} \quad \forall i \in I, \forall s \in S, \forall m \in M \end{array} \right. \quad (4.12)$$

Les constriccions que restaran tal i com apareixien en la modelització anterior són

$$\left\{ \begin{array}{l} P_t^{min} \leq p_{i,t}^{Diari} \leq P_t^{max} \\ g_i^{B,s} = t_i^{B,s} (\alpha_i^s + \beta_i^s t_i^{B,s}) \quad \forall i \in I, \forall s \in S \\ p_{i,t}^{A,s} = p_{i,t}^{A,s'} \quad \forall s, s' \in S | ((\lambda_i^{D,s}, \lambda_i^{A,s}) = (\lambda_i^{D,s'}, \lambda_i^{A,s'}) \forall i \in I), \forall t \in T \end{array} \right. \quad (4.13)$$

I, per últim, s'eliminaran algunes constriccions que, tot i no afectar en el model només comportarien un augment del cost computacional sense aportar significativament cap informació. Aquestes son les referents a la definició de la potència cassada segons la definició amb la qual es determinava aquesta en el capítol 3, és a dir:

$$\left\{ \begin{array}{l}
 p_{i,t}^{Diari} \leq P_{i,t}^{\lambda,s} z_{i,t}^s + M_{gran}(1 - z_{i,t}^s) \quad \forall i \in I, \forall t \in T, \forall s \in S \\
 v_{i,t}^s \leq M_{gran}(1 - z_{i,t}^s) \quad \forall i \in I, \forall t \in T, \forall s \in S \\
 P_{i,t}^{\lambda,s}(1 - z_{i,t}^s) \leq p_{i,t}^{Diari} - v_{i,t}^s \quad \forall i \in I, \forall t \in T, \forall s \in S \\
 p_{i,t}^{D,s} \leq P_{i,t}^{\lambda,s}(1 - z_{i,t}^s) + M_{gran}z_{i,t}^s \quad \forall i \in I, \forall t \in T, \forall s \in S \\
 p_{i,t}^{D,s} = p_{i,t}^{Diari} - v_{i,t}^s \quad \forall i \in I, \forall t \in T, \forall s \in S
 \end{array} \right. \quad (4.14)$$

### 4.2.3 Formulació final

En conclusió, tal i com s'ha descrit totes les constriccions s'expressen de forma lineal encara que la funció objectiu sigui quadràtica respecte la potència cassada. Per tant, finalment es planteja un problema de programació no lineal entera mixt, la formulació final del qual resta:

$$\max \sum_{it} [\lambda_t^{D,s} p_{i,t}^{D,s} - c_t^J p_{i,t}^{D,s} - c_t^q (p_{i,t}^{D,s})^2] \pi^s + \sum_s [\sum_t l_i^{A,k} \lambda_t^{A,s}] \pi^s + \sum_s [\sum_t (g_i^{B,s} - \sum_i c_t^J p_{i,t}^{B,s})] \pi^s$$

$$\begin{aligned}
& \left. \begin{aligned}
& tram_{i,t}^1 = P_i^{min} \quad \forall i \in I, \forall t \in T \\
& tram_{i,t}^N = P_i^{max} \quad \forall i \in I, \forall t \in T \\
& tram_{i,t}^{N-1} = p_{i,t}^{Diari} \quad \forall i \in I, \forall t \in T \\
& tram_{i,t}^n \leq tram_{i,t}^{(n+1)} \quad \forall i \in I, \forall t \in T, \forall s \in S, \forall n \in N \\
& tram_{i,t}^n \leq P_{i,t}^{\lambda,s} w_{i,t}^{s,n} + M(1 - w_{i,t}^{s,n}) \quad \forall i \in I, \forall t \in T, \forall s \in S \\
& P_{i,t}^{\lambda,s} w_{i,t}^{s,n} \leq tram_{i,t}^{n+1} \quad \forall i \in I, \forall t \in T, \forall s \in S \\
& \sum_{n \in N} w_{i,t}^{s,n} = 1 \quad \forall i \in I, \forall t \in T, \forall s \in S \\
& u_{i,t}^{s,n} \leq tram_{i,t}^n \quad \forall i \in I, \forall t \in T, \forall n \in N \\
& tram_{i,t}^n - u_{i,t}^{s,n} = prof_{i,t}^{s,n} \quad \forall i \in I, \forall t \in T, \forall s \in S, \forall n \in N \\
& prof_{i,t}^{s,n} \leq w_{i,t}^{s,n} M_{gran3} \quad \forall i \in I, \forall t \in T, \forall s \in S, \forall n \in N \\
& u_{i,t}^{s,n} \leq (1 - w_{i,t}^{s,n}) M_{gran2} \quad \forall i \in I, \forall t \in T, \forall s \in S, \forall n \in N \\
& \sum_{n \in N} prof_{i,t}^{s,n} = p_{i,t}^{D,s} \quad \forall i \in I, \forall t \in T, \forall s \in S \\
& p_{i,t}^{D,s} + p_{i,t}^{B,s} + \frac{1}{2} p_{i,t}^{A,s} \leq P_t^{max} \quad \forall i \in I, \forall t \in T, \forall s \in S \\
& p_{i,t}^{D,s} + p_{i,t}^{B,s} - \frac{1}{2} p_{i,t}^{A,s} \geq P_t^{min} \quad \forall i \in I, \forall t \in T, \forall s \in S \\
& p_{i,t}^{D,s} + p_{i,t}^{B,s} + \frac{1}{2} p_{i,t}^{A,s} - (p_{i,(t-1)}^{D,s} + p_{i,(t-1)}^{B,s} + \frac{1}{2} p_{i,(t-1)}^{A,s}) \\
& \leq (1 - on_{i,t}^s) R_i^{up} \quad \forall i \in I, \forall t \in T, \forall s \in S \\
& p_{i,(t-1)}^{D,s} + p_{i,(t-1)}^{B,s} + \frac{1}{2} p_{i,(t-1)}^{A,s} - (p_{i,t}^{D,s} + p_{i,t}^{B,s} + \frac{1}{2} p_{i,t}^{A,s}) \\
& \leq (1 - on_{i,t}^s) R_i^{down} \quad \forall i \in I, \forall t \in T, \forall s \in S \\
& p_{i,t}^{A,s} \leq on_{i,t}^s P_t^A \quad \forall i \in I, \forall t \in T, \forall s \in S \\
& t_i^{m,s} = \sum_{t \in T} p_{i,t}^{m,s} \quad \forall i \in I, \forall s \in S, \forall m \in M \\
& P_t^{min} \leq p_{i,t}^{Diari} \leq P_t^{max} \\
& g_i^{B,s} = t_i^{B,s} (\alpha_t^s + \beta_t^s t_i^{B,s}) \quad \forall i \in I, \forall s \in S
\end{aligned} \right\} s.a.2
\end{aligned}$$

$$s.a.2 \quad \left\{ \begin{array}{l} p_{i,t}^{A,s} = p_{i,t}^{A,s'} \quad \forall s, s' \in S | ((\lambda_i^{D,s}, \lambda_i^{A,s}) = (\lambda_i^{D,s'}, \lambda_i^{A,s'})) \forall i \in I, \forall t \in T \\ prof_{i,t}^{s,n} \geq 0, tram_{i,t}^n, u_{i,t}^{m,s} \geq 0, p_{i,t}^{m,s} \geq 0, t_i^{m,s} \geq 0, t_{i,n}^{B,s} \geq 0, p_{i,t}^{Diari} \geq 0, v_{i,t}^s \geq 0 \\ \forall m \in M, \forall i \in I, \forall t \in T, \forall s \in S, \forall n \in B \\ on_{i,t}^s, w_{i,t}^s \in \{0, 1\} \quad \forall i \in I, \forall t \in T, \forall s \in S \end{array} \right.$$

### 4.3 Formulació separada

A continuació es presenta i descriu la modelització de la nova funció d'oferta esglaonada sense integrar-se en la modelització multi-mercat, és a dir, com un problema d'optimització separat. Així doncs, a partir de la funció d'oferta resultant del model presentat en el capítol 3 es defineix la *step function* sense intervenir en la primera, o sigui, a *posteriori*. L'objectiu de la modelització continuarà sent, però, la maximització dels beneficis.

En base a aquest nou enfocament sobre la nova definició de la funció d'oferta, tot seguit es presenta la modelització construïda.

#### 4.3.1 Funció objectiu

La funció objectiu maximitza els beneficis del Mercat Diari tenint en compte la potència cassada segons la nova formulació. Així doncs, la funció resta com:

$$\max \sum_{i,t,s} [\lambda_t^{D,s} p_{i,t}^s - c_t^l p_{i,t}^s - c_t^q (p_{i,t}^s)^2] \pi^s \quad (4.15)$$

on:

- $p_{i,t}^s$  és la variable que indica la potència calculada a partir de la potència cassada per la unitat  $t$ , l'interval horari  $i$  i l'escenari  $s$  segons la nova funció d'oferta esglaonada,
- $c_t^l$  és el paràmetre que indica el coeficient lineal del cost de producció de la unitat  $t$ ,
- $c_t^q$  és el paràmetre que indica el coeficient quadràtic del cost de producció de la unitat  $t$ .

Per tal de que la definició d'aquesta funció objectiu sigui coherent amb el model, és necessari construir un conjunt de constriccions amb l'objectiu de poder determinar la potència cassada amb la nova funció d'oferta segons les dades inicials presentades.

### 4.3.2 Constriccions

Donat que la modelització presentada en aquest capítol es tracta d'un problema separable les constriccions que es presenten a continuació són les ja presentades en l'apartat anterior, és a dir, en la modelització integrada.

Així doncs, en primer lloc s'inclou el conjunt de constriccions (4.4) que determinen els graons  $tram_{i,t}^n$  de la funció d'oferta tot considerant, donat que es tracta de la modelització de la funció d'oferta per separat,  $P_{i,t}^{Diari}$  com a un coeficient i no una variable.

Igualment, el model separat també es componrà de les constriccions (4.6) per tal de definir la potència cassada  $p_{i,t}^s$  com (4.9) construint abans  $prof_{i,t}^{s,n}$  definida en (4.5).

Tenint en compte que aquest model considera com una dada inicial la funció d'oferta no esglaonada resultant del model presentat en el capítol 3, no s'inclou cap més constricció en la modelització per separat. Així doncs, el model presentat no busca una funció d'oferta factible de cara la generació de les unitats i òptima considerant la possible oferta en el Mercat Diari, de Secundària i Intradiari, sinó que l'objectiu és esglaonar de forma òptima respecte els beneficis a obtenir la funció d'oferta ja calculada per un altre model a priori.

### 4.3.3 Formulació final

En conclusió, doncs, el programa separat on es defineix una funció d'oferta esglaonada a partir de la funció d'oferta òptima calculada mitjançant el model presentat en el capítol 3 és un model no lineal enter mixt expressat com:

$$\begin{aligned}
\max \quad & \sum_{its} [\lambda_t^{D,s} p_{i,t}^s - c_t^l p_{i,t}^s - c_t^q (p_{i,t}^s)^2] \pi^s \\
\text{s.a.} \quad & \left\{ \begin{array}{l}
\text{tram}_{i,t}^n \leq \text{tram}_{i,t}^{(n+1)} \quad \forall i \in I, t \in T, s \in S, n \in N \\
\text{tram}_{i,t}^n \leq P_{i,t}^{\lambda,s} w_{i,t}^{s,n} + M(1 - w_{i,t}^{s,n}) \quad \forall i \in I, \forall t \in T, \forall s \in S \\
P_{i,t}^{\lambda,s} w_{i,t}^{s,n} \leq \text{tram}_{i,t}^{n+1} \quad \forall i \in I, \forall t \in T, \forall s \in S \\
\sum_{n \in N} w_{i,t}^{s,n} = 1 \quad \forall i \in I, \forall t \in T, \forall s \in S \\
u_{i,t}^{s,n} \leq \text{tram}_{i,t}^{(n+1)} \quad \forall i \in I, t \in T, n \in N \\
\text{tram}_{i,t}^{n+1} - u_{i,t}^{s,n} = \text{prof}_{i,t}^{s,n} \quad \forall i \in I, t \in T, s \in S, n \in N \\
\text{prof}_{i,t}^{s,n} \leq w_{i,t}^{s,n} M_{gran3} \quad \forall i \in I, t \in T, s \in S, n \in N \\
u_{i,t}^{s,n} \leq (1 - w_{i,t}^{s,n}) M_{gran2} \quad \forall i \in I, t \in T, s \in S, n \in N \\
\sum_{n \in N} \text{prof}_{i,t}^{s,n} = p_{i,t}^s \quad \forall i \in I, t \in T, s \in S
\end{array} \right.
\end{aligned}$$

## 4.4 Anàlisi dels resultats

A continuació es presenten els resultats obtinguts en els dos models construïts, presentant una comparació entre ells i respecte el model presentat en el capítol anterior.

Les dades utilitzades són les originals de l'article [11] modificats els escenaris d'acord amb la descripció realitzada en el capítol anterior.

### 4.4.1 Anàlisi computacional i econòmic

En el present apartat es realitza un estudi sobre el cost computacional que comporta la resolució dels dos models presentats: integrat i separat. Prenent consciència que el segons es pot considerar una part del primer, es pot deduir que el cost esperat de resolució del primer sigui molt major, donat que el problema és separable però en el cas d'estar integrat les variables de cada part resten relacionades.



Les execucions que apareixen en aquest capítol s'han obtingut utilitzant com a resolutor AMPL+CPLEX 11.0, executant-se en 4 processadors AMD Opteron 2222 de 3 GHz i 32 Gb de memòria RAM.

En primer lloc, avaluant la complexitat del model integrat es pot observar l'alt nombre de variables noves introduïdes, en especial de binàries. Aquest fet té directament repercussió en el cost de resolució del model.

Així mateix, i prèviament a analitzar les solucions resultants del model, cal tenir en compte la definició del paràmetre GAP. Per tal de poder definir-lo cal tenir en compte que el *software* AMPL+cplex utilitza l'algorisme de Branch&Cut per tal de resoldre els problemes de programació entera, descrit en [2]. L'algorisme crea un arbre els nodes del qual va explorant a partir de les relaxacions lineals dels problemes que va ramificant, és a dir, a partir de les solucions obtingudes sense considerar el fet que algunes variables siguin enteres. Així doncs, explorant l'arbre es va disposant de solucions no enteres òptimes dels problemes relaxats alhora que de solucions enteres no òptimes fins finalitzar l'algorisme. El paràmetre GAP es calcula, tal i com s'explicita en [9], relativament a la diferència entre la millor solució entera que es disposa i la solució de la relaxació lineal del problema. Per tant, aquest paràmetre és una fita superior a la distància màxima, en termes de la funció objectiu, a la que la millor solució entera coneguda es troba de l'òptima.

Per tant, tenir un valor GAP prou petit assegura que, tot i no tenir la solució òptima, s'ha obtingut una solució acceptable. Tanmateix, tenir un valor GAP gran no implica tenir una solució dolenta donat que aquest paràmetre només és una fita superior a la distància entre la millor solució entera trobada i la solució entera òptima. Tenint en compte el que s'ha exposat, és possible que el GAP sigui una mesura que no permeti, en alguns casos, valorar prou estrictament l'error.

L'anàlisi sobre els resultats obtinguts amb el model integrat es realitza en el present apartat amb l'objectiu de poder valorar la solució obtinguda com a tal, però mitjançant la comparació del resultat obtingut amb el que es disposa del model de la millora 1, el qual es considera correcte donat el paràmetre GAP que el correspon i fita superior dels resultats a obtenir en la modelització del capítol present donat la pròpia construcció de cada model. És a dir, tenint en compte que la funció d'oferta definida en la modelització anterior és òptima però lineal i en aquest model la funció d'oferta esglaonada es construeix a partir d'aquesta, es considera la solució del model del capítol anterior com a fita superior del model present. D'aquesta manera es pot acotar suficientment l'error de la solució obtinguda amb el nou model sense necessitat d'usar com a referència el valor que pren el paràmetre GAP i valorar-lo de manera que no es consideri que es situa a una distància excessiva de l'òptim.

En el quadre 4.1 s'observa el resultat obtingut amb el model integrat descrit en el present capítol respecte la solució associada obtinguda en el model del capítol 2. Tot i que el GAP obtingut en les diferents execucions de la nova modelització és molt gran, la solució obtinguda no és gaire allunyada de la que s'obtenia en el model de la Millora 1, sent aquesta última un valor de referència donat que el seu GAP relatiu corresponent és tan sols d'un 0,39%. Així doncs, en els quadres següents s'inclou en primer lloc la solució obtinguda en el capítol 3 com a valor de referència, amb l'objectiu de poder mesurar la qualitat de les execucions en funció de la diferència que respecte aquest valor presenten.

| COMPARATIVA MILLORA 2 INTEGRAT vs. MILLORA 1 |        |       |         |                |
|--|--------|-------|---------|----------------|
| MODEL  | TEMPS  | GAP % | TOTAL € | DIFERÈNCIA (%) |
| Millora 1                                    | 2.400  | 0,39  | 153.770 | -              |
| Millora 2 i                                  | 1.200  | 42,22 | 147.040 | 4,37           |
| Millora 2 i                                  | 2.400  | 42,22 | 147.048 | 4,37           |
| Millora 2 i                                  | 3.600  | 42,17 | 147.095 | 4,34           |
| Millora 2 i                                  | 40.000 | 41,38 | 147.649 | 3,98           |

Taula 4.1: Costos computacionals millora 2 integrat fixant temps màxim amb dades a dilluns 7 de juny 04 i totes les unitats (*temps expressat en segons*).

En particular, la divergència de les solucions obtingudes amb el temps més petits respecte la solució en el model de la Millora 1 és com a molt d'un 4.5%. Així doncs, tot i que el valor GAP de la solució trobada és molt gran, el resultat obtingut no es distancia excessivament de la solució òptima del model de la Millora 1 que es disposa com a fita. En el quadre citat es pot observar com amb un temps d'execució de 40.000 segons s'aconsegueix una diferència d'aproximadament un 4%, diferència prou petita. Tot i així, el cost computacional ha augmentat de forma rellevant conseqüentment amb el fet d'haver introduït un nombre important de variables binàries.

D'altra banda, a continuació es presenten els resultats obtinguts amb el model separat presentat en el capítol. En la taula 4.2 es presenta la solució obtinguda amb el temps *solve* necessari per tal d'obtenir aquesta en diverses execucions, fixant diferents valors màxims pel temps d'execució. Com es pot observar, els valors GAP obtinguts en cada execució són de magnituds molt més petites que en el model integrat (4.1), fet lògic tenint en compte que aquest model es pot considerar una part de l'anterior. Tot i així, l'increment en temps no es veu correspost per un increment qualitatiu de la solució obtinguda.

| EXECUCIONS MODEL SEPARAT FIXANT TEMPS |         |           |             |       |
|---------------------------------------|---------|-----------|-------------|-------|
| BENEFICI TOTAL (€)                    | B&B     | MIP       | TEMPS EXEC. | GAP % |
| 51.869                                | 1.271   | 20.257    | 30          | 1,72  |
| 51.869                                | 3.122   | 31.996    | 60          | 1,72  |
| 51.869                                | 11.810  | 93.995    | 120         | 1,72  |
| 51.869                                | 33.399  | 247.789   | 300         | 1,72  |
| 51.869                                | 63.900  | 460.093   | 600         | 1,71  |
| 51.869                                | 158.201 | 1.139.982 | 1.200       | 1,70  |
| 51.869                                | 242.212 | 1.797.660 | 2.400       | 1,70  |

Taula 4.2: Costos computacionals millora 2 separat fixant temps màxim amb dades a dilluns 7 de juny 04 i totes les unitats (*temps expressat en segons*).

A continuació es realitza un estudi comparatiu dels models implementats en aquest capítol respecte el de l'anterior, és a dir, els resultats obtinguts fixant que la funció d'oferta sigui esglaonada respecte la modelització que no inclou aquesta consideració.

#### 4.4.2 Anàlisi comparatiu I: millora1 vs. model millora 2

En la present secció, es realitza un anàlisi comparatiu entre els models descrits en el capítol respecte la modelització plantejada com a Millora 1. En primer lloc, es du a terme la comparació del model integrat, de manera que, a diferència de l'apartat anterior els valors resultants del model de la Millora 1 no es citen com a referència sinó com a correspondència dels presents amb l'objectiu de que la comparació sigui factible.

En el quadre 4.3 es compara la solució obtinguda pel model integrat corresponent a aquest capítol respecte el presentat en el capítol 3. Les dues solucions s'obtenen amb execucions de temps diferents de manera que es puguin considerar qualitativament correctes. Tal i com s'observa, el benefici obtingut mitjançant el nou model és menor a l'aconseguit amb el primer model. Aquest fet és coherent donat que la millor oferta és l'expressada mitjançant la recta, de manera que qualsevol aproximació ha de presentar pèrdues.

Per altra banda, en el mateix quadre també es presenta la solució obtinguda en el cas que els graons amb que es defineix la funció siguin equidistants, és a dir, en el cas que no es consideri la optimització de la posició d'aquests sinó que es fixin a partir del valor que prengui la variable  $p_{i,t}^{Diari}$ . Com es pot observar, la diferència respecte el model de la

Millora 1 és superior a un 4%, tot i que aquesta mateixa diferència pel model integrat és de 5,67%. Fixar els trams mitjançant el model d'optimització aconsegueix millorar els resultats obtinguts com a benefici esperat.

| COMPARATIVA MILLORA 2 INTEGRAT vs. MILLORA 1 |       |         |              |
|--|-------|---------|--------------|
| MODEL  | GAP % | TOTAL € | DIFERÈNCIA % |
| Millora 1                                    | 0,39  | 93.682  | -            |
| Millora 2 i                                  | 13,94 | 89.193  | 4,79         |
| Equiespaiat i                                | 13,68 | 88.380  | 5,67         |

Taula 4.3: Millora 2 integrat vs. millora 1 amb dues unitats.

En segon lloc, es realitza una comparació anàloga a l'anterior sent, en aquesta ocasió, dels resultats obtinguts mitjançant el model separable presentat en el capítol respecte la modelització presentada com a Millora 1.

Cal fer esmena que el model separat parteix de la solució resultant mitjançant el model presentat en el capítol 3 per tal d'obtenir una funció d'oferta diferent. Per tant, respecte la recta òptima que relaciona preu i potència a partir de la qual es base l'obtenció de la funció d'oferta en la formulació de la Millora 1, la nova funció d'oferta serà una aproximació d'aquesta, de manera que, respecte els beneficis calculats en el Mercat Diari s'apreciarà un guany donat que la funció esglaonada es defineix per sobre tal i com es mostra en el gràfic 4.2. En 4.5 s'observa com la solució obtinguda amb la nova funció d'oferta atribueix 5,92% més dels beneficis calculats amb el model anterior. La solució pel cas equiespaiat, en aquest cas, no presenta diferència respecte el model d'optimització.

| COMPARATIVA MILLORA 2 PER SEPARAT vs. MILLORA 1 |       |         |              |
|---|-------|---------|--------------|
| MODEL   | GAP % | TOTAL € | DIFERÈNCIA % |
| Millora 1                                       | 0,39  | 48.799  | -            |
| Millora 2 s                                     | 1,70  | 51.869  | 5,92         |
| Equiespaiat s                                   | -     | 51.869  | 5,92         |

Taula 4.4: Millora 2 per separat vs. millora 1 amb totes les unitats.

Així doncs, tot i que la nova modelització presenti un cost computacional molt més alt que la modelització presentada en el capítol 3, mitjançant aquest model s'obté una funció d'oferta esglaonada, tal i com marquen els requeriments expressats per MIBEL, optimitzada a partir de la simplificació lineal fixant com a objectiu la maximització de beneficis.

#### 4.4.3 Anàlisi comparatiu II: model integrat vs. separat

A continuació es presenta un anàlisi comparatiu entre els resultats obtinguts mitjançant la versió integrada del model presentat en el capítol respecte la separada. Amb aquest estudi es pretén poder valorar un i altre model amb l'objectiu de determinar les avantatges o desavantatges que comporta l'ús de un o altre i, d'acord amb l'objectiu fixat, determinar si és significatiu introduir la determinació dels graons dins la pròpia modelització multi-mercat respecte la funció d'oferta resultant.

En primer lloc, en la taula 4.5 es mostren els resultats obtinguts en ambdós models respecte el model presentat en el capítol 3, executant els tres models amb les dades de dues unitats. Tal i com es pot observar, el valor de la solució de benefici calculat per al Mercat Diari entre el model del capítol 3 i el model separat és força semblant. És important recordar que el model separat s'executa a partir de la solució obtinguda mitjançant el primer model.

El model integrat, en canvi, presenta una diferència important respecte el Mercat Diari. Tanmateix, aquest no és un model que s'executa *a posteriori* sinó que el propi model és multi-mercat. Referenciant-nos, doncs, amb el benefici global calculat tot i el valor GAP associat, s'observa que la diferència respecte el model del capítol 3 a nivell econòmic no és gaire gran tal i com s'ha analitzat en apartats posteriors.

Les solucions a nivell de benefici econòmic, doncs, no són comparables directament, donat que per una banda, no es disposa de la solució òptima pel model integrat i, per l'altra, el model separat obté els beneficis pel Mercat Diari exclusivament i el model integrat obté els beneficis del Mercat Diari conjuntament amb els dels models posteriors, és a dir, s'obtenen solucions diferents. Per tant, comparar el benefici resultant al Mercat Diari no és indicatiu perquè obtenir més o menys guany en el Mercat Diari no implica assolir menys beneficis globalment.

A nivell computacional, tal i com s'observa en 4.1 i 4.2 el cost d'execució del model integrat és molt més alt que el segon. Aquest fet és esperat tenint en compte la complexitat de cada un d'ells i el fet que el model separat té definit com a *input* la sortida del model del capítol 3. Així doncs, s'observa com en línies generals el temps necessari per tal d'executar consecutivament el model del capítol anterior i el model

| COMPARATIVA MILLORA 2 PER SEPARAT, MILLOR 2 INTEGRAT I MILLORA 1 |       |         |             |         |             |
|--|-------|---------|-------------|---------|-------------|
| MODEL  | GAP % | B.DIARI | DIF.DIARI % | B.TOTAL | DIF.TOTAL % |
| Millora 1  | 0,15  | 42.391  | 0           | 93.485  | 0           |
| Millora 2 i  | 13,94 | 12.934  | 69,49       | 89.193  | 4,61        |
| Millora 2 s  | 0     | 45.876  | 8,22        | —       | —           |

Taula 4.5: Millora 2 separat vs. Millora 2 integrat amb dues unitats (*expressat en euros*)

separat és menor al temps necessari pel model integrat.

Tanmateix, i d'acord amb l'objectiu de poder valorar la significació d'integrar la definició dels graons dins el propi model multi-mercat, sí que es poden comparar les funcions d'oferta obtingudes per tal de poder conèixer si la integració d'aquests trams afecta en la funció d'oferta resultant. En la figura 4.4 es compara la funció d'oferta obtinguda amb el model integrat i separat. A més a més, en aquest també es representa la recta a partir de la qual el model integrat construeix els graons.

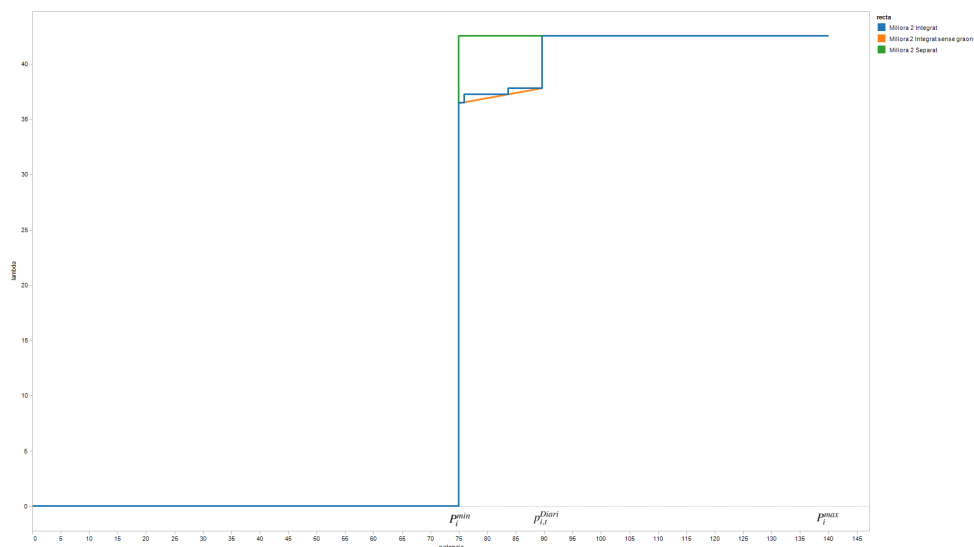


Figura 4.4: Funció d'oferta òptima esglaonada per a la unitat 1, hora 4 i dades a dilluns 7 de juny del 2.004 (models executats amb dues unitats).

Tal i com es representa en 4.4, el valor que pren la variable de primera etapa  $p_{i,t}^{Diari}$  en

el model integrat no és el mateix que en el model del capítol anterior, on aquest valor és justament el lílndar mínim de producció per la unitat  $i$ . Així doncs, la determinació dels graons de la funció d'oferta globalment dins el model multi-mercat repercuteix en la determinació del valor de potència màxima a reservar pel Mercat Diari  $i$ , en conseqüència, en la funció d'oferta final. El resultat de definir els graons *a posteriori* no és el mateix que en la seva introducció dins el model. Per tant, integrant la definició dels graons dins la optimització en el model multi-mercat s'obtenen funcions d'oferta resultants diferents. Tenint en compte que sota els requeriments de MIBEL la funció d'oferta a presentar cal que es defineixi discretament mitjançant parells preu - energia, el model integrat descrit en el present capítol és una bona opció donat que dins la mateixa modelització multi-mercat s'engloba la determinació d'aquests graons.

## 4.5 Conclusions i possibles millores

En el capítol present es descriuen dos models: l'integrat, un model multi-mercat on s'optimitza la determinació dels graons de la funció d'oferta resultant a nivell de benefici global; i el separat, un model que a partir de la funció d'oferta òptima lineal obtinguda mitjançant la modelització del capítol anterior construeix una funció esglaonada maximitzant-ne els beneficis.

L'objectiu del segon model és valorar l'impacte que la integració de la definició dels graons en que es construeix la funció d'oferta té en la determinació d'aquesta, és a dir, analitzar si el fet d'introduir la definició dels graons dins el model, és a dir, la consideració dels requeriments de MIBEL, té repercussió en la funció oferta resultant.

Per tal de valorar l'impacte econòmic de la optimització plantejada en cada model respecte el fet de definir la funció d'oferta esglaonada sent aquests graons variables a determinar, es compara cada model amb els seu respectiu definint els trams de forma equidistant. Pel cas separat s'observa com no existeix una diferència significativa. Tanmateix, tot i l'alt valor GAP obtingut, pel model integrat s'observa que la diferència mesurada a nivell de benefici respecte la solució obtinguda en el model del capítol anterior és major en el cas equiespaiat que en el model integrat genèric. Donat que la funció d'oferta lineal del capítol anterior es considera òptima, qualsevol aproximació per defecte o per excés no es valora positivament, de manera que el model integrat sense la restricció de graons equidistants sembla presentar un cert avantatge.

Els resultats econòmics del model integrat i el separat respecte els obtinguts en el model del capítol 3 són competents, tenint en compte la pèrdua esperada per la pròpia nova potència cassada respecte la funció esglaonada de cada respectiu model, funció que es pot entendre com una aproximació de la del model anterior.

La complexitat de resolució del primer és gran comparativament parlant respecte el model d'oferta multi - mercat presentat en el capítol 3. Per contra, en el model separat s'observa un cost d'execució menor, tot i tenir en compte el cost d'execució del model presentat en el capítol anterior, donat que la sortida d'aquest forma part de les dades input del model.

Finalment, es representen les funcions d'oferta obtingudes mitjançant ambdues modelitzacions. En la representació es reflecteix com la integració de la definició dels graons en que es determina la funció d'oferta dins la pròpia modelització repercuteix en els resultats obtinguts, donat que la funció no és coincident amb la obtinguda pel model separat. En concret es mostra com la potència ofertada amb el nou model representa un 23% del rang de potència de que disposa la unitat, i mitjançant el model del capítol anterior i el model separat és la mínima que pot produir, és a dir, dins el rang de valors en que es pot moure és el mínim.

En conseqüència, doncs, l'increment del cost computacional que presenta el model integrat es veu acompanyat d'un guany qualitatiu en els resultats obtinguts per part de la funció d'oferta tenint en compte els requeriments de MIBEL, donat que integrant la determinació dels graons en que es forma aquesta funció d'oferta dins la pròpia modelització resulten funcions d'oferta diferents i, per tant, integrar en la modelització la definició dels graons té impacte en els resultats de la optimització obtinguts.

Un cop obtinguda la definició de la funció d'oferta per trams per al Mercat Diari, una possible futura consideració es podria centrar en la introducció de costos quadràtics en el Mercat Intradiari, mantenint com a objectiu millora la funció d'oferta resultant. Així mateix, també es podrien considerar definicions alternatives a la funció d'oferta esglaonada. D'altres possibles consideracions, encara que més subtils tenint en compte l'aportació que presenten, podrien ser la introducció del que s'anomena 'unit commitment', és a dir, possibilitat d'encendre o no les unitats generadores.





## Capítol 5

# Conclusions

Posteriorment a la realització i presentació dels diversos models definits i construïts és d'especial rellevància englobar i valorar els resultats obtinguts d'acord amb els objectius plantejats inicialment encara que el seu contingut sigui traçable. A continuació es presenten les conclusions més rellevants i significatius que s'extreuen de cada un dels capítols presentats alhora que s'aporta una visió global del propi projecte.

A partir de l'article [11] on es presenta un model d'optimització d'oferta multi-mercat, s'analitzen les característiques del model i algunes de les possibles millores a realitzar. Aquestes millores motiven el desenvolupament de dos nous models amb característiques diferents.

En el projecte present es procedeix, en primer lloc, a l'estudi del reglament i funcionament del mercat elèctric i, en particular, del MIBEL. En el segon capítol, es procedeix a l'anàlisi, comprensió i implementació de l'article [11]. Donat que en aquest s'aproximen els costos de producció energètica linealment, en el següent capítol es desenvolupa un nou model amb costos quadràtics i introduint un nou model d'oferta òptima. Per últim, en el capítol 4 es desenvolupa un tercer model a partir de l'anterior per tal d'obtenir una funció d'oferta esglaonada com les que descriuen les regles del Mercat Diari de MIBEL.

Així doncs, l'objectiu bàsic del capítol 2 es centra en comprendre i implementar el model estocàstic lineal i mixte presentat en l'article per tal de detectar possibles millores en aquest. La definició de la funció d'oferta que en aquest article es presenta es considera millorable donat que es basa en la interpretació dels parells preu-energia de cada escenari com els punts de la corba d'oferta. Aquest procediment d'obtenció de la corba d'oferta òptima presenta alguns aspectes semblen millorables, com ara el fet d'allunyar-se de la metodologia de la programació estocàstica en no incorporar variables

de primera etapa, la necessitat d'introduir constriccions "ad-hoc" per forçar que els valors de l'energia ofertada siguin no decreixents respecte els preus, i el fet que no es reserva energia per als mercats posteriors, sent aquesta última una objecció menor. Així mateix, també es detecta que els costos associats a la producció d'energia s'aproximen de forma lineal enlloc d'expressar-se quadràticament. Aquests punts es tracten i milloren en el model presentat en el següent capítol.

En el model desenvolupat en el següent capítol s'incorporen les millores detectades a l'article [11] en el Mercat Diari. El model resultant és un model estocàstic quadràtic mixte amb un cost computacional més baix que l'anterior i competitiu econòmicament parlant, presentant característiques molt diferents en la funció d'oferta resultant. La nova funció d'oferta es construeix a partir d'una variable de primera etapa que permet que la nova oferta no depengui directament dels escenaris, podent reservar més energia pels mercats posteriors. Els resultats obtinguts per aquesta variable mostren com la reserva d'energia pot determinar-se a un 50% del rang de potència en que pot variar. Per tant, limitar l'energia ofertada al Mercat Diari presenta una millora al model donat que la funció d'oferta resultant no depèn de cada escenari ni es construeix a partir d'aquests.

Tot i així, la funció d'oferta definida en 3 no compleix els requeriments establerts per MIBEL. Definir els graons en la funció d'oferta provoca un canvi en el benefici obtingut. La integració de la determinació d'aquests graons dins el propi model multi-mercat és l'objectiu del model presentat en 4. Analitzant els resultats obtinguts determinant els graons de forma integrada o separada es conclou com la introducció d'aquests en el model provoca la obtenció de funcions d'oferta diferents. En concret, aquesta oferta podia ser nul·la en el model anterior (mínima potència) o fins al 23% del rang de potència en que pot variar mitjançant la introducció dels graons. Així doncs, es conclou que la integració del requeriment de definir la funció d'oferta de forma esglaonada afecta als beneficis esperats i la funció d'oferta calculada en funció d'aquests.

Així doncs, en aquest punt és inevitable presentar-se possibles línies per on seguir l'estudi. La reformulació de la funció d'oferta al Mercat Intradiari introduint-hi costos quadràtics respecte la producció d'energia en línia amb el Mercat Diari, amb la seva conseqüent reformulació dels guanys pot ser-ne un exemple. Anàlogament, també es pot considerar construir un nou arbre d'escenaris que no sigui fan podria millorar la descripció de les variables aleatòries a través de l'arbre d'escenaris. Així mateix, encara que amb menys rellevància, també es podria considerar la possible aturada i engegada de les unitats generadores, fet que es coneix per 'unit commitment' o adaptar els models presentats per tal de poder ser executats un cop es coneix la cassació del primer mercat, el Diari.

En conclusió, doncs, en el present projecte s'analitzen, estudien i desenvolupen

diferents models amb el mateix objectiu però amb característiques diferents. Els resultats assolits en cada model mostren l'impacte positiu de les noves consideracions plantejades així com noves línies de treball.



# Apèndix A

## Annexos

A continuació s'exposen els codis AMPL dels arxius .mod emprats en els quatre models implementats en aquest projecte.

### A.1 Replica article.mod

```
1 ##### CONJUNTS
2 set M;          # Mercats (d-> diari,a-> AGC,b->Balancing Market)
3 set M2;        # Mercats (d-> diari,a-> AGC)
4
5 param nGU integer ≥ 0;
6 set GU:= 1..nGU;          # Unitats de generació elèctrica
7
8 param nH integer ≥ 0;     # Cardinal de H
9 set H := 1..nH ordered;  # hores en les que es genera
10
11 param nSC integer ≥ 0;   # Cardinal de SC
12 set SC := 1..nSC;       # Escenaris
13
14 param nB integer ≥ 0;    # Cardinal de B
15 set B:= 1..nB;          # Blocs de la funció de venda del
16                          # balancing market (primer intradiari)
17
18 ##### PARÀMETRES
19 #----- Inicials -----
20 param c {GU};           # Cost d'operar de cada unitat
21
22 #----- Generals -----
23 param pAGC {GU} ≥ 0;    # Potència unitat mercat AGC (MW)
```

```

24 param pmax {GU} ≥ 0; # Potència màxima unitat (MW)
25 param pmin {GU} ≥ 0; # Potència mínima unitat (MW)
26
27 param rdown {GU} ≥ 0; # Rampa de baixada unitat (MW/h)
28 param rup {GU} ≥ 0; # Rampa de pujada unitat (MW/h)
29
30 param tmax {H} ≥ 0; # Energia màxima Balancing hora (MWh)
31 param pi {SC} ≥ 0; # Probabilitat de cada escenari
32
33
34 #--- de les v.a. aleatòries
35 param lam {M2,H,SC} ≥ 0; # preu hora h mercat M esc k
36
37 # Vigilar si depenent dels escenaris o no
38 param alpha {H,SC}; # Intersecció de la corba de demanda inversa
39 # corresponent a cada hora en el Balancing
40 # Market (ordenada a l'origen)
41 param beta {H,SC}; # Pendent de la corba de demanda inversa
42 # corresponent a cada hora en el Balancing
43
44
45
46 ##### VARIABLES
47 #----- Variables de 2a etapa (depenen del escenaris)
48 var p {GU,M,H,SC} ≥ 0; # Potència de la unitat j en el mercat m,
49 # hora h i escenari k (MW).
50 var q {GU,M,H,SC} ≥ 0; # Energia de la unitat j en el mercat m,
51 # hora h i escenari k (MWh).
52 var t {M,H,SC} ≥ 0; # Energia total produïda en el mercat m,
53 # hora h i escenari k (MWh).
54
55 var g {H,SC} ≥ 0; # Preu venda hora h esc k del Balancing Market
56
57 #----- Binàries
58 var on {GU,H,SC} binary; #->1 si la unitat g està engegada
59 #en la hora h i l'escenari k
60
61
62 #F.O.
63 maximize total_profit:
64     sum {k in SC} ( sum {h in H} ( t['d',h,k]*lam['d',h,k]
65     - sum {j in GU} ( c[j]*q[j,'d',h,k] ) ) ) *pi[k]
66     + sum {k in SC} ( sum {h in H} ( t['a',h,k]*lam['a',h,k] ) ) *pi[k]
67     + sum {k in SC} ( sum {h in H} (
68     (<<{r in 1..(nB-1)} ((2*r-(nB+1))/abs(2*r-(nB+1))) )
69     * (tmax[h]/(nB/2));
70     {s in B}alpha[h,k] + ( 2*tmax[h] *(2*s - (nB+1))
71     * beta[h,k] )/nB >> t['b',h,k] )

```

```

72         - sum{j in GU}( c[j]*q[j,'b',h,k] )) ) * pi[k];
73
74
75 #CONSTRICCIONES
76 subject to increasingmarket_a
77     {h in H, j in GU, k in 1..nSC, kprima in 1..nSC}:
78     (if lam['d',h,k] < lam['d',h,kprima] then
79         q[j,'d',h,k] - q[j,'d',h,kprima] ) ≤ 0;
80
81 subject to energybalance1 {h in H, k in SC, x in M}:
82     t[x,h,k] = sum{j in GU} (q[j,x,h,k]);
83
84 subject to energybalance2 {j in GU, h in H, k in SC, x in M}:
85     (if h<>first(H) then
86         (q[j,x,h,k]) - 0.5*(p[j,x,h-1,k] + p[j,x,h,k]) ) = 0;
87
88 subject to functioning1_power {j in GU, h in H, k in SC}:
89     q[j,'d',h,k] + q[j,'b',h,k]
90     + 0.5 * q[j,'a',h,k] ≤ pmax[j];
91
92 subject to functioning2_power {j in GU, h in H, k in SC}:
93     q[j,'d',h,k] + q[j,'b',h,k]
94     - 0.5 * q[j,'a',h,k] ≥ pmin[j];
95
96 subject to functioning3_energy {j in GU, h in H, k in SC}:
97     p[j,'d',h,k] + p[j,'b',h,k] ≤ pmax[j];
98
99 subject to functioning4_energy {j in GU, h in H, k in SC}:
100    p[j,'d',h,k] + p[j,'b',h,k] ≥ pmin[j];
101
102 subject to functioning5_capacity {j in GU, h in H, k in SC}:
103    q[j,'a',h,k] ≤ on[j,h,k] * pAGC[j];
104
105 subject to functioning6_ramp {j in GU, h in H, k in SC}:
106    (if h<>first(H) then
107        ( p[j,'d',h,k] + p[j,'b',h,k]
108        - ( p[j,'d',h-1,k] + p[j,'b',h-1,k] ) )
109        ≤ ( 1 - on[j,h,k] ) * rup[j] );
110
111 subject to functioning7_ramp {j in GU, h in H, k in SC}:
112    (if h<>first(H) then
113        ( p[j,'d',h-1,k] + p[j,'b',h-1,k]
114        - ( p[j,'d',h,k] + p[j,'b',h,k] ) )
115        ≤ ( 1 - on[j,h,k] ) * rdown[j] );

```



## A.2 Millora 1.mod

```

1 ##### CONJUNTS
2
3 set M;          # Mercats (d-> diari,a-> AGC,b->Balancing Market)
4 set M2;        # Mercats (d-> diari,a-> AGC)
5
6 param nGU integer ≥ 0;
7 set GU:= 1..nGU;          # Unitats de generació elèctrica
8
9 param nH integer ≥ 0;          # Cardinal de H
10 set H := 1..nH ordered;      # hores en les que es genera
11
12 param nSC integer ≥ 0;        # Cardinal de SC
13 set SC := 1..nSC;           # Escenaris
14
15 param nB integer ≥ 0;        # Cardinal de B
16 set B:= 1..nB;              # Blocs de la funció de venda
17                             #-del balancing market (primer intradiari)
18
19
20 ##### PARÀMETRES
21 #----- Nombres -----
22 param M_gran ≥ 0;           # artifici matemàtic, numero gran
23
24 #----- Inicials -----
25 param c {GU};              # Cost d'operar de cada unitat
26 param cq {GU};            # Cost d'operar de cada unitat
27
28 #----- Generals -----
29 param pAGC {GU} ≥ 0;       # Potència unitat pel mercat de AGC (MW)
30 param pmax {GU} ≥ 0;      # Potència màxima de cada unitat (MW)
31 param pmin {GU} ≥ 0;      # Potència mínima de cada unitat (MW)
32
33 param rdown {GU} ≥ 0;     # Rampa de baixada de cada unitat (MW/h)
34 param rup {GU} ≥ 0;      # Rampa de pujada de cada unitat (MW/h)
35
36 param tmax {H} ≥ 0;      # Energia màxim a ser trasportada en el
37                             #-Balancing Market a cada hora (MWh)
38 param pi {SC} ≥ 0;      # Probabilitat de cada escenari
39
40
41 #--- de les v.a. aleatories
42 param lam {M2,H,SC} ≥ 0;  # preu en la hora h del mercat
43                             # M en l'escenari k
44

```

```

45 # Vigilar si depenent dels escenaris o no
46 param alpha {H,SC};      # Intersecció de la corba de demanda inversa
47                          # corresponent a cada hora en el Balancing
48                          #-Market (ordenada a l'origen)
49 param beta {H,SC};      # Pendent de la corba de demanda inversa
50                          #-corresponent a cada hora
51                          # en el Balancing Market
52
53 # De la nova formulació;
54 param p_lambda {GU,H,SC}; # energia òptima de cada
55                          # escenari pel mercat diari;
56
57
58 ##### VARIABLES
59 #----- Variables de la etapa (no depenen del escenaris)
60 var q_diari {GU,H} ≥ 0; # energia em reservo pel mercat diari
61                          # unitat j hora h.
62
63
64 #----- Variables de 2a etapa (depenen del escenaris)
65 var q {GU,M,H,SC} ≥ 0; # Energia unitat j Mercat
66                          # hora h esc k (MWh).
67 var t {M,H,SC} ≥ 0; # Energia total produïda mercat m,
68                          # hora en el Balancing Market
69                          # hora h esc k (MWh).
70
71 var g {H,SC} ≥ 0; # Preu venta a hora h i escenari k Balancing
72 var v {GU,H,SC} ≥ 0; # Auxiliar;
73
74 #----- Binàries
75 var on {GU,H,SC} binary; #->1 si la unitat g està engegada en
76                          # la hora h i l'escenari k
77 var z {GU,H,SC} binary; # auxiliar;
78
79
80 #F.O.
81 maximize total_profit:
82     sum {k in SC}( sum{h in H}( t['d',h,k]*lam['d',h,k]
83     - sum{j in GU}( c[j]*q[j,'d',h,k] + cq[j]*q[j,'d',h,k]*
84     q[j,'d',h,k] ) ) ) *pi[k]
85     + sum {k in SC}( sum{h in H}( t['a',h,k]*lam['a',h,k] ) ) *pi[k]
86     + sum {k in SC}( sum{h in H}( ( <<{r in 1..(nB-1)}
87     ((2*r-(nB+1))/abs(2*r-(nB+1)) ) * (tmax[h]/(nB/2));
88     {s in B}alpha[h,k] + ( 2*tmax[h] *(2*s - (nB+1))
89     * beta[h,k] )/nB >> t['b',h,k] )
90     - sum{j in GU}( c[j]*q[j,'b',h,k] ) ) ) *pi[k];
91
92

```

```

93 #CONSTRICCIONS
94 subject to minim_q_diari {h in H,j in GU}:
95     q_diari [j,h] ≥ pmin [j];
96
97 subject to maxim_q_diari {h in H,j in GU}:
98     q_diari [j,h] ≤ pmax [j];
99
100 subject to fixem_z_1 {h in H,j in GU,k in 1..nSC}:
101     q_diari [j,h] ≤ p_lambda [j,h,k] * z[j,h,k]
102     + M_gran * ( 1 -z[j,h,k] );
103
104 subject to fixem_v {h in H,j in GU,k in 1..nSC}:
105     v [j,h,k] ≤ M_gran * ( 1 - z[j,h,k]);
106
107 subject to fixem_v_2 {h in H,j in GU,k in 1..nSC}:
108     p_lambda [j,h,k] * ( 1 - z[j,h,k] ) ≤ q_diari [j,h] - v [j,h,k];
109
110 subject to fixem_p_casada {h in H,j in GU,k in 1..nSC}:
111     q [j,'d',h,k] ≤ p_lambda [j,h,k] *(1 - z[j,h,k])
112     + M_gran * z[j,h,k];
113
114 subject to fixem_p_casada_2 {h in H,j in GU,k in 1..nSC}:
115     q [j,'d',h,k] + v [j,h,k] = q_diari [j,h];
116
117 subject to energybalance1 {h in H, k in SC, x in M}:
118     t[x,h,k] = sum{j in GU} (q[j,x,h,k]);
119
120 subject to functioning1_power {j in GU, h in H, k in SC}:
121     q[j,'d',h,k] + q[j,'b',h,k] + 0.5 * q[j,'a',h,k] ≤ pmax[j];
122
123 subject to functioning2_power {j in GU, h in H, k in SC}:
124     q[j,'d',h,k] + q[j,'b',h,k] - 0.5 * q[j,'a',h,k] ≥ pmin[j];
125
126 subject to functioning5_capacity {j in GU, h in H, k in SC}:
127     q[j,'a',h,k] ≤ on[j,h,k] * pAGC[j];
128
129 subject to functioning6_ramp {j in GU, h in H, k in SC}:
130     (if h<>first(H) then
131         ( q[j,'d',h,k] + q[j,'b',h,k]+ 0.5 * q[j,'a',h,k]
132         - ( q[j,'d',h-1,k] + q[j,'b',h-1,k]+ 0.5 * q[j,'a',h-1,k] ) )
133     ≤ ( 1 - on[j,h,k] ) * rup[j] );
134
135 subject to functioning7_ramp {j in GU, h in H, k in SC}:
136     (if h<>first(H) then
137         ( q[j,'d',h-1,k] + p[j,'b',h-1,k]+ 0.5 * q[j,'a',h-1,k]
138         -( q[j,'d',h,k] + q[j,'b',h,k] + 0.5 * q[j,'a',h,k]))
139     ≤ ( 1 - on[j,h,k] ) * rdown[j] );

```

## A.3 Millora 2 integrat.mod

```

1  ##### CONJUNTS
2
3  set M;          # Mercats (d-> diari,a-> AGC,b->Balancing Market)
4  set M2;         # Mercats (d-> diari,a-> AGC)
5
6  param nGU integer ≥ 0;
7  set GU:= 1..nGU;      # Unitats de generació elèctrica
8
9  param nH integer ≥ 0;      # Cardinal de H
10 set H := 1..nH ordered;    # hores en les que es genera
11
12 param nSC integer ≥ 0;     # Cardinal de SC
13 set SC := 1..nSC;         # Escenaris
14
15 param nB integer ≥ 0;     # Cardinal de B
16 set B:= 1..nB;           # Blocs de la funció de venda
17                          #del balancing market (primer intradiari)
18
19 param nT integer ≥ 0;     # Cardinal de SC
20 set T := 1..nT ordered;
21
22
23 ##### PARÀMETRES
24 #----- Nombres -----
25 param M_gran ≥ 0;         # artifici matemàtic, numero gran
26 param M_gran2 ≥ 0;       # artifici matemàtic, numero gran
27 param M_gran3 ≥ 0;
28
29 #----- Inicials -----
30 param c {GU};            # Cost d'operar de cada unitat
31 param cq {GU};          # Cost d'operar de cada unitat
32
33 #----- Generals -----
34 param pAGC {GU} ≥ 0;     # Potència unitat pel mercat de AGC (MW)
35 param pmin {GU} ≥ 0;    # Potència mínima de cada unitat (MW)
36
37 param rdown {GU} ≥ 0;   # Rampa de baixada de cada unitat (MW/h)
38 param rup {GU} ≥ 0;    # Rampa de pujada de cada unitat (MW/h)
39
40 param tmax {H} ≥ 0;     # Energia màxima Balancing hora h(MWh)
41 param pi {SC} ≥ 0;     # Probabilitat de cada escenari
42
43
44 #--- de les v.a. aleatories

```

```

45 param lam {M2,H,SC} ≥ 0;      # preu hora h mercat M esc k
46
47 # Vigilar si dependent dels escenaris o no
48 param alpha {H,SC};          # Intersecció corba de demanda inversa
49                               # corresponent a cada hora en el Balancing
50                               # Market (ordenada a l'origen)
51 param beta {H,SC};           # Pendent de la corba de demanda inversa
52                               # corresponent a cada hora en el Balancing
53
54 # De la nova formulació;
55 param p_lambda {GU,H,SC};     # energia òptima esc mercat diari;
56
57
58 ##### VARIABLES
59 #----- Variables de la etapa (no depenen del escenaris)
60 var q_diari {GU,H} ≥ 0; # energia em reservo pel mercat diari
61                               # de la unitat j i hora h.
62 var tram {H,GU,T} ≥ 0;
63
64 #----- variables de segona etapa
65 var w {H,GU,SC,T} binary;
66 var prof {H,GU,SC,T} ≥ 0;
67 var u {H,GU,SC,T} ≥ 0;
68
69 #----- Variables de 2a etapa (depenen del escenaris)
70 var q {GU,M,H,SC} ≥ 0; # Energia unitat j mercat m,
71                               #hora h i esc k (MWh).
72 var t {M,H,SC} ≥ 0; # Energia total produïda
73                               #mercat m, hora h, esc k (MWh).
74 var g {H,SC} ≥ 0; # Preu venda a hora h i esc k Balancing
75 var v {GU,H,SC} ≥ 0; # Auxiliar;
76
77 #----- Binàries
78 var on {GU,H,SC} binary; #->1 si la unitat g està
79                               # engegada en la hora h i l'escenari k
80 var z {GU,H,SC} binary; # auxiliar;
81
82
83 #F.O.
84 maximize total_profit:
85     sum {k in SC, h in H, j in GU} ( lam['d',h,k] * q[j,'d',h,k]
86     - c[j]*q[j,'d',h,k] - cq[j]*q[j,'d',h,k]*q[j,'d',h,k] ) * pi[k]
87 + sum {k in SC} ( sum {h in H} ( t['a',h,k]*lam['a',h,k] ) ) * pi[k]
88 + sum {k in SC} ( sum {h in H} ( (<<r in 1..(nB-1))
89     ((2*r-(nB+1))/abs(2*r-(nB+1))) * (tmax[h]/(nB/2));
90     {s in B} alpha[h,k] + ( 2*tmax[h] *(2*s - (nB+1))
91     * beta[h,k] ) / nB >> t['b',h,k] )
92     - sum {j in GU} ( c[j]*q[j,'b',h,k] ) ) * pi[k];

```

```

93
94
95 #CONSTRICCIONS
96
97 # constriccions trams 2
98 subject to max_u {h in H,j in GU, k in SC, s in T}:
99     u [h,j,k,s] ≤ tram[h,j,s] ;
100
101 subject to aux {h in H,j in GU,k in SC, s in T}:
102     tram[h,j,s] - u [h,j,k,s] = prof [h,j,k,s];
103
104 subject to aux2 {h in H,j in GU,k in SC, s in T}:
105     prof [h,j,k,s] ≤ w [h,j,k,s] * M_gran3;
106
107 subject to aux3 {h in H,j in GU,k in SC, s in T}:
108     u [h,j,k,s] ≤ ( 1 - w [h,j,k,s] ) * M_gran2;
109
110 subject to potencia_h_esc{h in H,j in GU,k in SC}:
111     sum {s in T} prof [h,j,k,s] = q [j,'d',h,k];
112
113
114 # constriccions trams 1
115 subject to creixent {h in H,j in GU,s in 1..nT-1}:
116     tram [h,j,s] ≤ tram [h,j,s+1];
117
118 subject to aux4 {h in H,j in GU,k in SC, s in T}:
119     tram [h,j,s] ≤ p_lambda [j,h,k]* w [h,j,k,s]
120     + M_gran * ( 1 - w [h,j,k,s] );
121
122 subject to aux5 {h in H,j in GU,k in SC, s in 1..nT-1}:
123     p_lambda [j,h,k] * w [h,j,k,s] ≤ tram [h,j,s+1];
124
125 subject to aux6 {h in H, j in GU, k in SC}:
126     sum {s in T} w [h,j,k,s] = 1;
127
128 subject to t_min {h in H,j in GU}:
129     tram [h,j,1] = pmin [j];
130
131 subject to t_max {h in H,j in GU}:
132     tram [h,j,nT-1] = q_diari [j,h];
133
134 subject to t_max2 {h in H,j in GU}:
135     tram [h,j,nT] = pmax [j];
136
137
138 # resta del programa
139 subject to minim_p_diari {h in H,j in GU}:
140     q_diari [j,h] ≥ pmin [j];

```

```

141
142 subject to maxim_p_diari {h in H, j in GU}:
143     q_diari [j,h] ≤ pmax [j];
144
145 subject to energybalance1 {h in H, k in SC, x in M}:
146     t[x,h,k] = sum{j in GU} (q[j,x,h,k]);
147
148 subject to functioning1_power {j in GU, h in H, k in SC}:
149     q[j,'d',h,k] + q[j,'b',h,k] + 0.5 * q[j,'a',h,k] ≤ pmax[j];
150
151 subject to functioning2_power {j in GU, h in H, k in SC}:
152     q[j,'d',h,k] + q[j,'b',h,k] - 0.5 * q[j,'a',h,k] ≥ pmin[j];
153
154 subject to functioning5_capacity {j in GU, h in H, k in SC}:
155     q[j,'a',h,k] ≤ on[j,h,k] * pAGC[j];
156
157 subject to functioning6_ramp {j in GU, h in H, k in SC}:
158     (if h<>first(H) then
159         ( q[j,'d',h,k] + q[j,'b',h,k]+ 0.5 * q[j,'a',h,k]
160         - ( q[j,'d',h-1,k] + q[j,'b',h-1,k]+ 0.5 * q[j,'a',h-1,k] ) )
161         ≤ ( 1 - on[j,h,k] ) * rup[j] );
162
163 subject to functioning7_ramp {j in GU, h in H, k in SC}:
164     (if h<>first(H) then
165         ( q[j,'d',h-1,k] + p[j,'b',h-1,k]+ 0.5 * q[j,'a',h-1,k]
166         - ( q[j,'d',h,k] + q[j,'b',h,k] + 0.5 * q[j,'a',h,k] ) )
167         ≤ ( 1 - on[j,h,k] ) * rdown[j] );

```

## A.4 Millora 2 separat.mod

```

1 ##### CONJUNTS
2 set M;          # Mercats (d-> diari,a-> AGC,b->Balancing Market)
3 set M2;        # Mercats (d-> diari,a-> AGC)
4
5 param nGU integer ≥ 0;
6 set GU:= 1..nGU;      # Unitats de generació elèctrica
7
8 param nH integer ≥ 0;      # Cardinal de H
9 set H := 1..nH ordered;    # hores en les que es genera
10
11 param nSC integer ≥0;      # Cardinal de SC
12 set SC := 1..nSC;         # Escenari
13
14 param nB integer ≥ 0;      # Cardinal de B

```

```

15 set B:= 1..nB;          # Blocs de la funció de venda del balancing
16
17 param nT integer ≥0;    # Cardinal de SC
18 set T := 1..nT ordered;
19
20 ##### PARÀMETRES
21 #----- Nombres -----
22 param M_gran ≥0;        # artifici matemàtic, numero gran
23 param M_gran2 ≥0;      # artifici matemàtic, numero gran
24 param M_gran3 ≥0;
25
26 #----- Inicials -----
27 param c {GU};          # Cost d'operar de cada unitat
28 param cq {GU};        # Cost d'operar de cada unitat
29
30 #----- Generals -----
31 param pmin {GU} ≥ 0;    # Potència mínima de cada unitat (MW)
32 param pmax {GU} ≥ 0;
33 param pi {SC} ≥ 0;     # Probabilitat de cada escenari
34
35
36 #--- de les v.a. aleatòries
37 param lam {M2,H,SC} ≥ 0; # preu la hora h mercat M l'esc k
38
39
40 # De la nova formulació;
41 param p_lambda {GU,H,SC}; # Potència òptima esc mercat diari;
42 param p_diari {GU,H} ≥ 0; # Potència em reservo
43                               #mercat diari unitat j hora h.
44
45
46 ##### VARIABLES
47 #----- Variables de la etapa (no depenen del escenaris)
48 var tram {H,GU,T} ≥ 0;
49
50 #----- variables de segona etapa
51 var prof {H,GU,SC,T} ≥ 0;
52 var u {H,GU,SC,T} ≥ 0;
53 var q{H,GU,SC} ≥0 ;
54
55
56 #----- Binàries
57 var w {H,GU,SC,T} binary;
58
59
60 #F.O. PENDENT
61 maximize total_profit:
62     sum {k in SC, h in H, j in GU} ( lam['d',h,k] * q[h,j,k]

```



```

63     - c[j]*q[h,j,k] - cq[j]*q[h,j,k]*q[h,j,k] ) * pi[k];
64
65
66
67 #CONSTRICCIONS
68 # constriccions trams 2
69 subject to max_u {h in H, j in GU, k in SC, s in T}:
70     u [h,j,k,s] ≤ tram[h,j,s] ;
71
72 subject to aux {h in H, j in GU, k in SC, s in T}:
73     tram[h,j,s] - u [h,j,k,s] = prof [h,j,k,s];
74
75 subject to aux2 {h in H, j in GU, k in SC, s in T}:
76     prof [h,j,k,s] ≤ w [h,j,k,s] * M_gran3;
77
78 subject to aux3 {h in H, j in GU, k in SC, s in T}:
79     u [h,j,k,s] ≤ ( 1 - w [h,j,k,s] ) * M_gran2;
80
81 subject to potencia_h_esc {h in H, j in GU, k in SC}:
82     sum {s in T} prof [h,j,k,s] = q[h,j,k];
83
84
85 # constriccions trams 1
86 subject to creixent {h in H, j in GU, s in 1..nT-1}:
87     tram [h,j,s] ≤ tram [h,j,s+1];
88
89 subject to aux4 {h in H, j in GU, k in SC, s in T}:
90     tram [h,j,s] ≤ p_lambda [j,h,k] * w [h,j,k,s]
91     + M_gran * ( 1 - w [h,j,k,s] );
92
93 subject to aux5 {h in H, j in GU, k in SC, s in 1..nT-1}:
94     p_lambda [j,h,k] * w [h,j,k,s] ≤ tram [h,j,s+1];
95
96 subject to aux6 {h in H, j in GU, k in SC}:
97     sum {s in T} w [h,j,k,s] = 1;
98
99 subject to t_min {h in H, j in GU}:
100     tram [h,j,1] = pmin [j];
101
102 subject to t_max {h in H, j in GU}:
103     tram [h,j,nT-1] = p_diari [j,h];
104
105 subject to t_max2 {h in H, j in GU}:
106     tram [h,j,nT] = pmax[j];

```

## A.5 Arxius .dat

```

1
2 ## DATOS PAPER COMPLETOS
3
4 # CONJUNTS
5 set M:= d a b;
6 set M2:= d a;
7
8 ##### PARÀMETRES
9
10 #----- Nombres -----
11 param nGU:= 6;           # Cardinal unidades generaci3n
12 param nH:= 24;
13 param nB:= 2;           # Cardinal de B
14                          # (blocs balancing market- secundaria)
15 param nSC:= 25;        # Cardinal de SC
16
17
18 #----- Inicials GU -----
19 param c:=1 19.81 2 25.17 3 25.51 4 29.37 5 37.91 6 33.91;
20
21 #----- Generals GU -----
22 param pAGC:= 1 20 2 50 3 50 4 40 5 0 6 20;
23 param pmax:= 1 140 2 380 3 390 4 500 5 50 6 300;
24 param pmin:=1 75 2 160 3 180 4 250 5 25 6 200;
25 param rdown:= 1 65 2 220 3 210 4 250 5 25 6 100;
26 param rup:= 1 65 2 220 3 210 4 250 5 25 6 100;
27
28 param tmax:= 1 300 2 300 3 300 4 300 5 300 6 300 ...;
29
30 param pi:= 1 0.042 2 0.040 3 0.044 4 0.043 5 0.076 ...;
31
32 #----- De les aleat3ries
33 param lam:=
34   [d,*,*]:           1  2  3  4  5  6  7  8  9  10  1 ...
35 1   36.18   32.04   32.55   35.49   31.13   35.89 ...
36 2   30.23   30.41   28.28   33.63   29.52   30.59 ...
37 3   24.47   32.11   28.38   32.56   25.25   27.93 ...
38 4   25.69   31.45   27.04   31.29   24.58   30.17 ...
39 5   23.46   26.23   26.79   32.67   20.92   31.34 ...
40 6   23.91   32.00   26.14   33.20   20.37   33.01 ...
41 7   25.80   32.56   29.57   29.60   21.96   34.12 ...
42 8   29.21   34.17   30.81   33.60   27.23   36.89 ...
43 9   27.87   36.68   31.98   35.53   27.80   36.94 ...
44 10  32.40   41.52   31.78   36.10   28.29   38. ...

```

|    |    |             |       |       |       |       |         |       |      |     |   |     |     |
|----|----|-------------|-------|-------|-------|-------|---------|-------|------|-----|---|-----|-----|
| 45 | 11 | 33.50       | 41.35 | 32.60 | 36.86 | 29.67 | 42. ... |       |      |     |   |     |     |
| 46 | 12 | 35.42       | 45.73 | 33.98 | 37.03 | 29.11 | 43. ... |       |      |     |   |     |     |
| 47 | 13 | 33.75       | 45.64 | 31.49 | 37.04 | 28.61 | 43. ... |       |      |     |   |     |     |
| 48 | 14 | 35.07       | 41.35 | 34.44 | 35.26 | 31.13 | 42. ... |       |      |     |   |     |     |
| 49 | 15 | 32.38       | 38.41 | 27.33 | 33.72 | 28.77 | 36. ... |       |      |     |   |     |     |
| 50 | 16 | 31.96       | 37.76 | 25.50 | 30.85 | 26.89 | 40. ... |       |      |     |   |     |     |
| 51 | 17 | 32.90       | 39.75 | 28.33 | 32.72 | 27.59 | 39. ... |       |      |     |   |     |     |
| 52 | 18 | 34.15       | 42.25 | 27.99 | 35.39 | 28.20 | 45. ... |       |      |     |   |     |     |
| 53 | 19 | 33.33       | 39.95 | 29.56 | 32.22 | 26.13 | 42. ... |       |      |     |   |     |     |
| 54 | 20 | 30.93       | 37.67 | 26.68 | 30.44 | 24.04 | 41. ... |       |      |     |   |     |     |
| 55 | 21 | 27.90       | 34.22 | 21.30 | 26.71 | 20.52 | 36. ... |       |      |     |   |     |     |
| 56 | 22 | 33.52       | 36.96 | 21.67 | 31.71 | 24.34 | 42. ... |       |      |     |   |     |     |
| 57 | 23 | 33.98       | 36.51 | 25.39 | 32.02 | 28.37 | 42. ... |       |      |     |   |     |     |
| 58 | 24 | 26.01       | 33.60 | 22.54 | 29.49 | 23.24 | 37. ... |       |      |     |   |     |     |
| 59 |    |             |       |       |       |       |         |       |      |     |   |     |     |
| 60 |    | [a, *, *]:  | 1     | 2     | 3     | 4     | 5       | 6     | 7    | 8   | 9 | 10  | ... |
| 61 | 1  | 1.90        | 1.90  | 1.90  | 1.90  | 1.90  | 1.90    | 1.90  | 1.90 | ... |   |     |     |
| 62 | 2  | 3.53        | 3.53  | 3.53  | 3.53  | 3.53  | 3.53    | 3.53  | 3.53 | ... |   |     |     |
| 63 | 3  | 6.79        | 6.79  | 6.79  | 6.79  | 6.79  | 6.79    | 6.79  | 6.79 | ... |   |     |     |
| 64 | 4  | 6.62        | 6.62  | 6.62  | 6.62  | 6.62  | 6.62    | 6.62  | 6.62 | ... |   |     |     |
| 65 | 5  | 5.56        | 5.56  | 5.56  | 5.56  | 5.56  | 5.56    | 5.56  | 5.56 | ... |   |     |     |
| 66 | 6  | 2.77        | 2.77  | 2.77  | 2.77  | 2.77  | 2.77    | 2.77  | 2.77 | ... |   |     |     |
| 67 | 7  | 3.43        | 3.43  | 3.43  | 3.43  | 3.43  | 3.43    | 3.43  | 3.43 | ... |   |     |     |
| 68 | 8  | 2.74        | 2.74  | 2.74  | 2.74  | 2.74  | 2.74    | 2.74  | 2.74 | ... |   |     |     |
| 69 | 9  | 6.73        | 6.73  | 6.73  | 6.73  | 6.73  | 6.73    | 6.73  | 6.73 | ... |   |     |     |
| 70 | 10 | 3.69        | 3.69  | 3.69  | 3.69  | 3.69  | 3.69    | 3.69  | 3.69 | ... |   |     |     |
| 71 | 11 | 3.79        | 3.79  | 3.79  | 3.79  | 3.79  | 3.79    | 3.79  | 3.79 | ... |   |     |     |
| 72 | 12 | 3.74        | 3.74  | 3.74  | 3.74  | 3.74  | 3.74    | 3.74  | 3.74 | ... |   |     |     |
| 73 | 13 | 2.42        | 2.42  | 2.42  | 2.42  | 2.42  | 2.42    | 2.42  | 2.42 | ... |   |     |     |
| 74 | 14 | 4.75        | 4.75  | 4.75  | 4.75  | 4.75  | 4.75    | 4.75  | 4.75 | ... |   |     |     |
| 75 | 15 | 2.96        | 2.96  | 2.96  | 2.96  | 2.96  | 2.96    | 2.96  | 2.96 | ... |   |     |     |
| 76 | 16 | 2.69        | 2.69  | 2.69  | 2.69  | 2.69  | 2.69    | 2.69  | 2.69 | ... |   |     |     |
| 77 | 17 | 2.81        | 2.81  | 2.81  | 2.81  | 2.81  | 2.81    | 2.81  | 2.81 | ... |   |     |     |
| 78 | 18 | 1.71        | 1.71  | 1.71  | 1.71  | 1.71  | 1.71    | 1.71  | 1.71 | ... |   |     |     |
| 79 | 19 | 3.94        | 3.94  | 3.94  | 3.94  | 3.94  | 3.94    | 3.94  | 3.94 | ... |   |     |     |
| 80 | 20 | 2.86        | 2.86  | 2.86  | 2.86  | 2.86  | 2.86    | 2.86  | 2.86 | ... |   |     |     |
| 81 | 21 | 1.89        | 1.89  | 1.89  | 1.89  | 1.89  | 1.89    | 1.89  | 1.89 | ... |   |     |     |
| 82 | 22 | 0.58        | 0.58  | 0.58  | 0.58  | 0.58  | 0.58    | 0.58  | 0.58 | ... |   |     |     |
| 83 | 23 | 1.86        | 1.86  | 1.86  | 1.86  | 1.86  | 1.86    | 1.86  | 1.86 | ... |   |     |     |
| 84 | 24 | 2.29        | 2.29  | 2.29  | 2.29  | 2.29  | 2.29    | 2.29  | 2.29 | ... |   |     |     |
| 85 |    |             |       |       |       |       |         |       |      |     |   |     |     |
| 86 |    | param alpha | :1    | 2     | 3     | 4     | 5       | 6     | 7    | 8   | 9 | ... |     |
| 87 | 1  | 36.03       | 32.12 | 32.63 | 35.29 | 31.21 | 35.97   | 32.48 | ...  |     |   |     |     |
| 88 | 2  | 29.84       | 32.97 | 30.84 | 34.90 | 32.08 | 33.15   | 33.50 | ...  |     |   |     |     |
| 89 | 3  | 25.41       | 33.55 | 29.82 | 33.84 | 26.69 | 29.37   | 32.41 | ...  |     |   |     |     |
| 90 | 4  | 28.48       | 30.91 | 26.50 | 32.14 | 24.04 | 29.63   | 29.54 | ...  |     |   |     |     |
| 91 | 5  | 26.01       | 25.00 | 25.56 | 31.49 | 19.69 | 30.11   | 24.38 | ...  |     |   |     |     |
| 92 | 6  | 26.76       | 30.96 | 25.10 | 31.09 | 19.33 | 31.97   | 26.71 | ...  |     |   |     |     |

|     |             |        |        |        |        |        |        |        |        |        |     |    |    |    |    |
|-----|-------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-----|----|----|----|----|
| 93  | 7           | 27.52  | 34.00  | 31.01  | 28.56  | 23.40  | 35.56  | 30.49  | ...    |        |     |    |    |    |    |
| 94  | 8           | 30.82  | 32.20  | 28.84  | 33.17  | 25.26  | 34.92  | 29.18  | ...    |        |     |    |    |    |    |
| 95  | 9           | 29.48  | 35.85  | 31.15  | 34.65  | 26.97  | 36.11  | 29.77  | ...    |        |     |    |    |    |    |
| 96  | 10          | 34.11  | 42.10  | 32.36  | 37.25  | 28.87  | 39.27  | 35.63  | ...    |        |     |    |    |    |    |
| 97  | 11          | 35.31  | 43.34  | 34.59  | 38.11  | 31.66  | 44.23  | 33.63  | ...    |        |     |    |    |    |    |
| 98  | 12          | 38.58  | 45.40  | 33.65  | 42.05  | 28.78  | 43.39  | 33.68  | ...    |        |     |    |    |    |    |
| 99  | 13          | 36.88  | 45.56  | 31.41  | 40.88  | 28.53  | 43.80  | 36.09  | ...    |        |     |    |    |    |    |
| 100 | 14          | 37.03  | 41.43  | 34.52  | 35.44  | 31.21  | 42.91  | 33.49  | ...    |        |     |    |    |    |    |
| 101 | 15          | 33.47  | 38.56  | 27.48  | 35.06  | 28.92  | 36.61  | 27.45  | ...    |        |     |    |    |    |    |
| 102 | 16          | 32.45  | 38.11  | 25.85  | 32.66  | 27.24  | 41.29  | 27.45  | ...    |        |     |    |    |    |    |
| 103 | 17          | 31.82  | 39.78  | 28.36  | 33.28  | 27.62  | 39.03  | 25.51  | ...    |        |     |    |    |    |    |
| 104 | 18          | 35.24  | 41.39  | 27.13  | 36.62  | 27.34  | 44.35  | 30.90  | ...    |        |     |    |    |    |    |
| 105 | 19          | 36.15  | 39.06  | 28.67  | 32.52  | 25.24  | 41.87  | 27.73  | ...    |        |     |    |    |    |    |
| 106 | 20          | 31.05  | 37.22  | 26.23  | 30.94  | 23.59  | 41.01  | 25.97  | ...    |        |     |    |    |    |    |
| 107 | 21          | 30.90  | 36.05  | 23.13  | 27.96  | 22.35  | 38.51  | 26.81  | ...    |        |     |    |    |    |    |
| 108 | 22          | 35.11  | 38.84  | 23.55  | 34.74  | 26.22  | 44.76  | 30.16  | ...    |        |     |    |    |    |    |
| 109 | 23          | 35.28  | 37.53  | 26.41  | 35.02  | 29.39  | 43.33  | 28.66  | ...    |        |     |    |    |    |    |
| 110 | 24          | 27.49  | 34.57  | 23.51  | 27.11  | 24.21  | 38.66  | 27.47  | ...    |        |     |    |    |    |    |
| 111 |             |        |        |        |        |        |        |        |        |        |     |    |    |    |    |
| 112 |             |        |        |        |        |        |        |        |        |        |     |    |    |    |    |
| 113 | param beta: | 1      | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      | 7      | 8      | 9      | 10  | 11 | 12 | 13 | 14 |
| 114 | 1           | -0.005 | -0.005 | -0.005 | -0.005 | -0.005 | -0.005 | -0.005 | -0.005 | -0.005 | ... |    |    |    |    |
| 115 | 2           | -0.007 | -0.007 | -0.007 | -0.007 | -0.007 | -0.007 | -0.007 | -0.007 | -0.007 | ... |    |    |    |    |
| 116 | 3           | -0.001 | -0.001 | -0.001 | -0.001 | -0.001 | -0.001 | -0.001 | -0.001 | -0.001 | ... |    |    |    |    |
| 117 | 4           | -0.004 | -0.004 | -0.004 | -0.004 | -0.004 | -0.004 | -0.004 | -0.004 | -0.004 | ... |    |    |    |    |
| 118 | 5           | -0.003 | -0.003 | -0.003 | -0.003 | -0.003 | -0.003 | -0.003 | -0.003 | -0.003 | ... |    |    |    |    |
| 119 | 6           | -0.001 | -0.001 | -0.001 | -0.001 | -0.001 | -0.001 | -0.001 | -0.001 | -0.001 | ... |    |    |    |    |
| 120 | 7           | -0.001 | -0.001 | -0.001 | -0.001 | -0.001 | -0.001 | -0.001 | -0.001 | -0.001 | ... |    |    |    |    |
| 121 | 8           | -0.007 | -0.007 | -0.007 | -0.007 | -0.007 | -0.007 | -0.007 | -0.007 | -0.007 | ... |    |    |    |    |
| 122 | 9           | -0.004 | -0.004 | -0.004 | -0.004 | -0.004 | -0.004 | -0.004 | -0.004 | -0.004 | ... |    |    |    |    |
| 123 | 10          | -0.004 | -0.004 | -0.004 | -0.004 | -0.004 | -0.004 | -0.004 | -0.004 | -0.004 | ... |    |    |    |    |
| 124 | 11          | -0.001 | -0.001 | -0.001 | -0.001 | -0.001 | -0.001 | -0.001 | -0.001 | -0.001 | ... |    |    |    |    |
| 125 | 12          | -0.001 | -0.001 | -0.001 | -0.001 | -0.001 | -0.001 | -0.001 | -0.001 | -0.001 | ... |    |    |    |    |
| 126 | 13          | -0.002 | -0.002 | -0.002 | -0.002 | -0.002 | -0.002 | -0.002 | -0.002 | -0.002 | ... |    |    |    |    |
| 127 | 14          | -0.001 | -0.001 | -0.001 | -0.001 | -0.001 | -0.001 | -0.001 | -0.001 | -0.001 | ... |    |    |    |    |
| 128 | 15          | -0.005 | -0.005 | -0.005 | -0.005 | -0.005 | -0.005 | -0.005 | -0.005 | -0.005 | ... |    |    |    |    |
| 129 | 16          | -0.007 | -0.007 | -0.007 | -0.007 | -0.007 | -0.007 | -0.007 | -0.007 | -0.007 | ... |    |    |    |    |
| 130 | 17          | -0.002 | -0.002 | -0.002 | -0.002 | -0.002 | -0.002 | -0.002 | -0.002 | -0.002 | ... |    |    |    |    |
| 131 | 18          | -0.009 | -0.009 | -0.009 | -0.009 | -0.009 | -0.009 | -0.009 | -0.009 | -0.009 | ... |    |    |    |    |
| 132 | 19          | -0.008 | -0.008 | -0.008 | -0.008 | -0.008 | -0.008 | -0.008 | -0.008 | -0.008 | ... |    |    |    |    |
| 133 | 20          | -0.003 | -0.003 | -0.003 | -0.003 | -0.003 | -0.003 | -0.003 | -0.003 | -0.003 | ... |    |    |    |    |
| 134 | 21          | -0.001 | -0.001 | -0.001 | -0.001 | -0.001 | -0.001 | -0.001 | -0.001 | -0.001 | ... |    |    |    |    |
| 135 | 22          | -0.005 | -0.005 | -0.005 | -0.005 | -0.005 | -0.005 | -0.005 | -0.005 | -0.005 | ... |    |    |    |    |
| 136 | 23          | -0.004 | -0.004 | -0.004 | -0.004 | -0.004 | -0.004 | -0.004 | -0.004 | -0.004 | ... |    |    |    |    |
| 137 | 24          | -0.001 | -0.001 | -0.001 | -0.001 | -0.001 | -0.001 | -0.001 | -0.001 | -0.001 | ... |    |    |    |    |



# Bibliografía

- [1] L. J.-C. A.Ugedo, E. Lobato and J.Chofre. Strategic bidding in sequential electricity markets. *IEEE Proceedings online no.20045192, July 2006.*, 2005.
- [2] L. A.Wolsey. *Integer and Combinatorial Optimiztation*. 1988.
- [3] P. B. Chefi Triki and G. Gross. Optimal capacity allocation in multi-auction electricity markets under uncertainty. *Computers and Operations Research*, 2005., 2005.
- [4] B. O. del Estado nº 128. *Servicio complementario de regulación secundaria*. 2006.
- [5] B. O. del Estado nº 155. *Resolución 12693*. 2007.
- [6] B. O. del Estado nº 310. *Real Decreto 2019/1997*. 1997.
- [7] F. Heredia, M. Rider, and C.Corchero. Optimal bidding strategies for thermal ang generic programming units in the day-ahead electricity market. *submitted to IEEE Transaction on Power Systems, E-prints UPC - <http://hdl.handle.net/2117/2468>*, 2.008.
- [8] F. Heredia, M. Rider, and C.Corchero. A stochastic programming model for the optimal electricity market bid problem with bilateral contracts for thermal anc combined cycle units. *submitted to Annals of Operations Research, E-prints UPC - <http://hdl.handle.net/2117/2282>*, 2.008.
- [9] S. ILOG. *CPLEX optimization subroutine library guide and reference, System v11.0 User's Guide*. 2008.
- [10] F. L. J.R. Birge. *Introduction to Stochastic Programming*. Springer Series in Operations research, 1.997.

- 
- [11] M. Plazas, A.J.Conejo, and F.J.Prieto. Multimarket optimal bidding for a power producer. *IEEE transactions on power systems*, vol. 20, n<sup>o</sup>4, nov 2005., 2005.
  - [12] B. R.Fourer, D.M. Gay. *AMPL: A Modeling Language For Mathematical Programming, 2nd edition*. International Thomson Publishing, 2003.
  - [13] AMPL: A Modelling Language For mathematical Programming. <http://www.ampl.com>.
  - [14] Operador del Mercado Ibérico de Energía. <http://www.omel.es>.
  - [15] Red Eléctrica Española. <http://www.ree.es>.
  - [16] Sistema de Información del Operador del Sistema (Red Eléctrica de España). <http://www.esios.ree.es>.