

EXPERIÈNCIES D'ASSIGNACIÓ A CURT TERMINI D'UNITATS TÈRMiques
DE PRODUCCIÓ ELÈCTRICA PER BIFURCACIÓ ACOTADA

N. NABONA R. PLA

El subministrament d'electricitat exigeix la selecció de les unitats de producció més adients entre les disponibles a cada interval de temps. La consideració de les diferències entre les circumstàncies operatives a curt termini de les unitats tèrmiques i hidràuliques apunten la conveniència d'assignacions tèrmiques i hidràuliques desacobrades encara que coordinades.

Es formulen les constriccions i funció objectiu de l'assignació tèrmica i es justifica l'aplicació d'una metodologia de bifurcació acotada (branch-and-bound) per a optimitzar-la.

Es presenten les tècniques emprades per a pal·liar els inconvenients de dimensionalitat i temps de càlcul d'aquesta metodologia i s'analitzen els resultats obtinguts amb diversos casos pràctics.

a_k	= Temps mínim d'atur de la unitat k.		a l'interval j.
c_k	= Cost proporcional de la unitat k.	$r_k(.)$	= Funció reserva giratòria de la unitat k.
CT_j	= Càrrega a subministrar per les unitats tèrmiques a l'interval j.	RG_j	= Requeriment de reserva giratòria -- per a l'interval j.
d_j	= Durada de l'interval j.	$s_k^{(j)}$	= Status (1 marxa, 0 atur) de la unitat k a l'interval j.
$E, e_k^{(j)}$	= Cost total de les engegades i cost d'engegar la unitat k a l'interval j.	$ta_k^{(j)}$	= Temps que porta en atur la unitat k en arribar-se a l'interval j.
f_k	= Cost d'engegar en fred la unitat k.		
G	= Cost total de la generació tèrmica.		
h'_k, h''_k	= Coeficient que defineix la corba d'evolució del cost d'engegada segons el temps d'atur previ.		
j	= Un interval.		
k	= Una unitat tèrmica.		
M_j	= Conjunt de les unitats en marxa a l'interval j.		
m_k	= Temps mínim de marxa de la unitat tèrmica k.		
NC	= Dimensió màxima del vector on s'emmagatzemen jeràrquicament paraules totalment codificades amb assignacions.		
Ni	= Nombre d'intervals.		
Np	= Dimensió màxima del vector on s'emmagatzemen jeràrquicament paraules parcialment codificades amb assignacions.		
Nt	= Nombre de unitats tèrmiques.		
$P_k^{(j)}$	= Potència generada per la unitat k		

1. INTRODUCCIÓ

L'abastament d'electricitat als punts de consum d'una xarxa elèctrica exigeix una selecció per a cada instant, de les unitats de generació més adients d'entre les disponibles, de tal manera que tot respectant -- unes condicions imposades pel balanç entre les potències consumides i produïdes, i -- unes normes de seguretat, pugui ser optimitzada la producció en termes econòmics o d'altres al llarg del temps.

Per raons pràctiques no pot pretendre's -- d'obtenir les funcions contínues òptimes de variació en el temps de les variables que -- caracteritzen la producció elèctrica. Cal -- establir una quantificació del temps; així, donat un període d'optimització, aquest serà subdividit en un cert nombre d'intervals d'igual o diferent duració, i l'optimitza--

- Narcís Nabona del Centre de Càlcul de la U.P.B. Av. Dr. Gregorio Marañón, s/n. Barcelona 28.
- Ramón Pla estudiant a la Facultat de Ciències Econòmiques. Universitat de Barcelona. Diagonal 998. Barna. 34.
- Article rebut el Juny de 1978.

ció al llarg del temps abans esmentada tracta només de trobar, per a cadascun dels intervals, uns valors promig de les variables, i en el cas de l'assignació d'unitats, un status de marxa o atur de cada unitat de generació a cada interval de temps de curt termini.

El problema de la tria de les unitats és obviament més complicat com més dispars entre elles siguin les unitats de generació i -- llurs constriccions específiques. La principal divisió de les unitats de producció -- elèctrica és entre hidràuliques i tèrmiques. Les hidràuliques utilitzen un recurs, l'aigua embassada, sense cost però de disponibilitat limitada. Les tèrmiques necessiten un combustible, més o menys car sobre el qual però pot suposar-se en principi que no hi ha limitacions d'ús. D'entre les tèrmiques n'hi ha que utilitzen combustibles diversos de preu diferent amb una eficiència variable (quedant aquí incloses les centrals nuclears). També es diferencien les hidràuliques i les tèrmiques quant a les constriccions associades a l'engegada i parada de les unitats. Les hidràuliques s'engeguen i paren sense cost, podent-ho fer a qualsevol instant. Les tèrmiques tenen un cost d'engegada, variable segons el temps d'atur previ, i fins i tot un cost de parada, per malbaratar-se una certa quantitat de combustible, i a més tenen constriccions de temps mínim de marxa i d'atur imposades per condicionaments termo-mecànics. Les unitats nuclears han de ser considerades pràcticament com a rígides pel que fa no només a l'engegada i la parada, sinó també quant al nivel de producció, degut a condicionaments específics del combustible nuclear.

L'estacionalitat anual en la disponibilitat d'aigua embassada i les variacions cíclics estacionals, diàries, i horàries dels consums a satisfer, obliga a un primer planteig del problema a llarg termini, tenint en compte aportacions hidràuliques probables, i càrregues i disponibilitats d'unitats tèrmiques probables previstes per al període d'estudi /1/ i /2/. Aquest planteig, fora totalment de l'àmbit d'aquest article, assenyala com a resultat les fites hidràuliques a respectar com a cotes d'aigua inicials i finals per als estudis a curt termini, els quals -- han d'arribar a determinar els status marxa/

/atur i les produccions assignats a cada unitat hidràulica i tèrmica a cada interval curt de temps, tractant-se en general d'intervals d'una hora, per bé que també se'n consideren de més o menys durada segons el grau de variació de la càrrega consumida. -- També pertany al planteig de llarg termini la determinació de les produccions nuclears a cada interval llarg de temps, deixant-se fixa la potència nuclear generada durant -- els intervals curts /3/.

Per eficiència computacional i per tal de poder arribar a una solució d'assignació a curt termini per al cas més general de sistema integrat hidro-tèrmic, convé desacoblar les assignacions hidràulica i tèrmica a -- curt termini segons es justifica a l'apartat 3. Un cop desacoblada la part hidràulica, el problema de l'assignació tèrmica queda reduït al de satisfer amb les unitats -- tèrmiques unes càrregues a cada interval de les que hom ha deduït les corresponents produccions hidràuliques. El problema resultant és mixt, amb variables binàries per a designar si una certa unitat està engegada o parada en un interval donat, i amb variables reals per a indicar els nivells de producció de les unitats engegades.

Aquest mateix problema ha suscitat nombrosos treballs en els quals s'han emprat diverses tècniques segons quins aspectes del problema hi són simplificats o omesos, atès que una solució òptima de l'assignació d'unitats tèrmiques tenint en compte totes les -- constriccions és pràcticament inabastable. Una possible divisió dels mètodes existents és entre els que no utilitzen un ordre de -- mèrit rígid en la càrrega de les unitats -- tèrmiques per a satisfer un cert consum, i els que l'utilitzen. Entre els primers n'hi ha d'heuristics /4/ que tracten de minimitzar el cost trobant, per probatures successives, la millor combinació d'unitats a aturar després d'un pic de càrrega i a engegar abans del pic vinent i els instants d'aturar-les i engegar-les. Hi ha una extensió -- d'aquest mètode on a més s'imposa que un -- criteri numèric de seguretat expressat per la probabilitat d'insuficient capacitat de generació per a satisfer la càrrega estigui sempre per sota d'un valor preestablert /5/. També dins del primer grup n'hi ha que utilitzen programació dinàmica per a confegir

una taula amb les millors combinacions d'unitats per a satisfer cadascuna de les càrregues d'una successió dels seus possibles valors. A partir d'aquesta taula pot formular-se una assignació adaptada a les previsions de càrrega dels successius intervals de temps d'un període donat /6/. Una assignació obtinguda per aquest mateix procés és també utilitzada en un altre mètode que la modifica primer per a satisfer un índex numèric de seguretat, i després tot comprobant si no aturant una unitat que posteriorment s'engega hi ha una rebaixa en el cost d'operació /7/.

Els mètodes del grup que utilitza un ordre de mèrit en carregar les unitats, permeten generalment en contrapartida la incorporació de les constriccions de temps mínim de marxa i d'atur. Dins del grup hi ha un mètode que permet de rebaixar per probatures successives de programació dinàmica els costos d'operació /8/. També s'hi troben els procediments basats en la programació sencera /9/, un dels quals /10/ és de caràcter general arribant fins i tot a considerar unes constriccions linialitzades representant les limitacions degudes a la màxima capacitat de transmissió de les línies elèctriques. Un altre usant programació sencera basada en la programació lineal continua, ha de limitar-se a constriccions i funció objectiu linials /11/.

L'objecte d'aquest treball és la presentació d'una metodologia que utilitza un ordre de mèrit, basada en la bifurcació acotada¹, permetent tot tipus de constricció en la resolució de l'assignació tèrmica a curt termini. Se n'analitzen els resultats obtinguts i l'actuació dels programes preparats.

2. HIPÒTESIS SIMPLIFICADORES UTILITZADES

La metodologia d'assignació d'unitats que es presenta es recolza en dues hipòtesis simplificadores bàsiques.

2.1 Hipòtesi sobre la xarxa elèctrica

Hom suposarà que, tant pel dimensionament de la capacitat de les línies, com per la densitat d'interconnexions i relativament curtes

distàncies entre producció i consum (circumstàncies realistes si més no a la major part de les xarxes europees):

1er. Poden prendre's les pèrdues de transport com a pràcticament independents de la distribució de la generació entre les unitats, i

2on. No hi haurà limitacions a la generació en cap central ni grup de centrals degudes a la capacitat de transmissió de la xarxa.

Aquesta hipòtesi permet de prescindir de la xarxa en els estudis d'assignació d'unitats ja que:

- Les pèrdues seran una fracció aproximadament constant i determinable a priori de la càrrega total, podent per tant ser assimilades a la càrrega, consideració plausible donat que les càrregues considerades als intervals no són sinó avaluacions obtingudes per un programa predictor de càrregues.

- Qualsevol distribució de la generació entre les unitats de producció serà possible, no calguent sinó que el total de la generació iguali el total de la càrrega més les pèrdues que, d'ara endavant hom suposarà incorporades al total de la càrrega.

2.2 Hipòtesi sobre l'operació de les unitats tèrmiques segons un ordre de mèrit

Les unitats tèrmiques disponibles són sempre carregades segons un ordre de mèrit de menys a més cara d'explotació fins a satisfer la càrrega de consum total amb les pèrdues de transport incloses. Això significa no començar a posar càrrega sobre una certa unitat fins que totes les altres unitats disponibles que siguin més barates estiguin funcionant al límit màxim de capacitat.

Aquest ordre de mèrit en la càrrega només pot ser alterat per raó de la reserva giratòria /11/ a mantenir per les màquines en servei, descarregant màquines d'explotació barata carregades fins a llur límit de capacitat i carregant-ne de més cares a fi -

d'augmentar la reserva giratòria conjunta - (vegeu l'apèndix 1).

Tot ordre de mèrit està basat en costos de producció linials respecte a la potència generada, el qual és força aproximat llevat - del cas d'unitats multi-vàlvula en les quals poden donar-se costos linials per parts (corresponsents a l'interval de variació de cada vàlvula). És possible tanmateix considerar en el programa d'assignació d'unitats dissenyat cada part de cost linial com una unitat diferent retenint així la possibilitat d'emprar un ordre de mèrit per a la càrrega de les unitats.

2.3 Hipòtesi sobre la càrrega i la generació reactiva

Hom suposarà que les capacitats de generació reactiva de les unitats tèrmiques i hidràuliques assignades, comptant amb els mitjans auxiliars de compensació reactiva del sistema de potència, com compensadors síncrons i condensadors i reactàncies de potència, resulten sempre suficients per a la satisfacció de la càrrega reactiva dels intervals.

Això significa que no caldrà alterar cap assignació d'unitats trobada considerant només potències actives per motiu de la reactiva.

3. DESACOBLAMENT I COORDINACIÓ DE LES ASSIGNACIONS HIDRÀULIQUES I TÈRMIQUES

En el cas més general de sistema de potència mixt, alimentat per unitats tèrmiques i hidràuliques, les produccions tèrmiques i hidràuliques estan mutuament condicionades en llur balanç instantani pel valor del consum a satisfer entre l'una i l'altre. Malgrat -- que hi ha múltiples estudis sobre mètodes -- d'efectuar una assignació conjunta d'unitats hidro-tèrmiques /10/, hi ha tanmateix raons computacionals que aconsellen de desacoblar les assignacions hidràulica i tèrmica. Aquestes raons són fonamentalment:

- a) La diferent natura de les constriccions - associades a l'engegada i parada de les unitats tèrmiques i les de les hidràuliques. Les hidràuliques poden ser engegades

des i parades a qualsevol instant però - no així les tèrmiques que un cop marxant o aturades, han de romandre marxant o -- aturades durant un cert temps.

- b) El lligam entre embassaments que condiciona la generació de les unitats hidràuliques pel transpas d'aigua d'un embassament als embassaments aigües avall, i -- els retrassos de transport de l'aigua -- que hi pot haver entre embassaments consecutius molt distants, els quals són a tenir en compte a curt termini.
- c) Les produccions màximes i rendiments potència/cabal desembassat són funció de les cotes d'aigua dels embassaments.
- d) Les unitats tèrmiques en servei han de - mantenir en conjunt una r.g. no immediata predeterminada.
- e) El cost de producció és únicament de natura tèrmica, tant per engegades i aturades com per generació en les unitats tèrmiques.
- f) El cost de substitució de qualsevol producció hidràulica depèn tant del cost -- conjunt de les unitats tèrmiques en servei en l'instant en que es produeix la - substitució com del cost de les engegades i aturades que pot provocar o deixar de provocar una variació de la producció tèrmica a l'instant o interval en que es produeix la substitució.

De l'anterior hom pot deduir que el desacoblament és convenient si hom no vol prescindir de certes constriccions i detalls d'operació que poden afectar els resultats obtinguts ja que les variables i constriccions - que descriuen els processos tèrmic i hidràulic són massa diferents per a incloure'ls - en un únic problema d'optimització. Altrament seria per a un cas multi-embassament - amb una sola unitat tèrmica, o un cas de diverses unitats tèrmiques associades a un -- sol embassament.

La coordinació de les assignacions tèrmica i hidràulica no és immediata degut a la raó f) esmentada. Cal recórrer a un procediment de probes successives resolent cada vegada una assignació d'unitats tèrmiques on són -

satisfetes unes càrregues de les que hom --
 ha deduït les generacions hidràuliques de ca --
 da interval. A la figura 1 hom pot trobar --
 l'organigrama de la coordinació hidro-tèrmi --
 ca a curt termini i la seva relació amb la --
 gestió hidro-tèrmica a llarg termini i la --
 predicció de càrregues a curt termini. El --
 procés de successives assignacions tèrmiques
 i hidràuliques s'acaba quan no hi ha discre --
 pància significativa entre generacions --
 hidràuliques suposades i les trobades per --
 l'assignació hidràulica.

El problema abordat en aquest article és -

l'assignació d'unitats tèrmiques a curt ter --
 mini considerant pèrdues i generació hidrà --
 ulica incorporades i deduïda respectivament
 de la càrrega de cada interval i tenint en
 compte les hipòtesis simplificadores de l'a --
 partat 2.

4. FORMULACIÓ DE LES CONSTRICCIONS I DE LA FUNCIÓ OBJECTIU DE L'ASSIGNACIÓ

En un interval j dels N_i en que hom ha sub --
 dividit el període d'assignació, hi poden --
 haver unitats en marxa i unitats fora de --

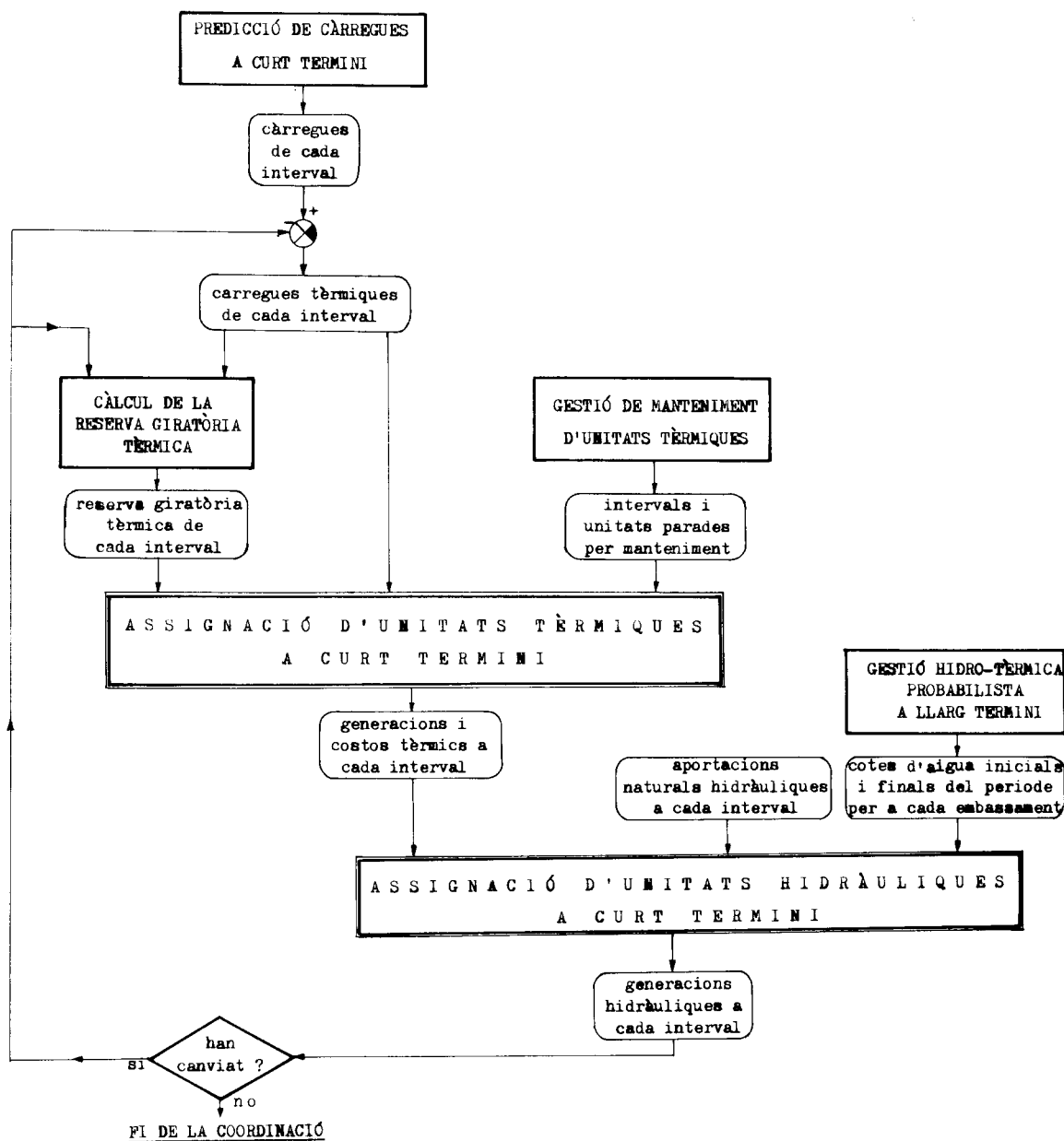


Fig. 1.

Organigrama de la coordinació de les assignacions hidràulica i tèrmica a curt termini

servei. Si la unitat k està en marxa (ho expressarem per $k \in M_j$) generarà una potència $p_k^{(j)}$ entre el seu mínim tècnic \underline{p}_k i la seva capacitat màxima \overline{p}_k . Si aquesta unitat k està aturada ($k \notin M_j$) $p_k^{(j)}$ valdrà zero, existint per tant una zona prohibida de generació entre zero i \underline{p}_k .

$$\begin{aligned} \underline{p}_k &\leq p_k^{(j)} \leq \overline{p}_k && (k \in M_j) \\ &&& j=1, 2, \dots, Nt \\ p_k^{(j)} &= 0 && (k \notin M_j) \end{aligned} \quad (1)$$

4.1 Constriccions de l'assignació d'unitats tèrmiques

Hi ha dos tipus diferents de constriccions: les que lliguen els generadors en servei a cada interval, i les que lliguen els status marxa/atur d'un generador al llarg dels successius intervals. Entre les primeres cal esmentar,

- a) La satisfacció de la càrrega tèrmica CT_j (veure apartat 2.1) de cada interval per part de les unitats en marxa

$$\sum_{\substack{k \\ k \in M_j}}^{Nt} p_k^{(j)} = CT_j \quad (2)$$

- b) L'existència d'una reserva giratòria (veure apèndix 1) igual o superior a un marge predeterminat RG_j

$$\sum_{\substack{k \\ k \in M_j}}^{Nt} r_k(p_k^{(j)}) \geq RG_j \quad (3)$$

De constriccions del tipus a) i b) se'n poden haver d'imposar més d'una aplicades a les unitats pertanyents a un subconjunt de M_j , podent utilitzar en el cas de la reserva giratòria funcions $r_k(\cdot)$ diferents de les $r_k(\cdot)$.

Pel que fa a les constriccions lligant els status de marxa i atur de cada unitat:

- c) Si una unitat k en marxa és treta de servei al començament de l'interval jp , ha de romandre aturada com a mínim fins al començament de l'interval je en que es compleixi

$$\sum_{j=je}^{je-1} d_j \geq a_k \quad k=1, 2, \dots, Nt \quad (4)$$

on d_j és la durada de l'interval j ; $a_k^{(j)}$ designarà el temps que porta aturada la unitat k en començar l'interval j .

- d) Si una unitat k aturada, és engegada al començament de l'interval je' , aquesta no podrà ser parada fins al començament d'un interval jp' tal que

$$\sum_{j=je'}^{jp'-1} d_j \geq m_k \quad k=1, 2, \dots, Nt \quad (5)$$

De les constriccions (4) i (5) en deduïm -- que els status de la unitat k dels intervals jp a $je-1$ queden obligats a ser d'atur, i els dels je' a $jp'-1$ obligats a marxa. També pot donar-se que imposem que una certa unitat estigui en marxa o atur durant un cert nombre d'intervals, en els quals, per claredat, direm que la unitat està forçada al status de marxa o atur (reservant els termes "obligar" i "obligada" als status de jo a $je-1$ i de je' a $jp'-1$ del punt anterior.

També poden donar-se les anomenades "constriccions de plantilla" que lliguen els canvis de status simultanis:

- e) No poden produir-se més d'un cert nombre de canvis de status de les unitats ubicades a una mateixa central on la plantilla sigui limitada i no pugui atendre l'engegada o parada simultània de totes les unitats amb que compta la central.

Degut a les constriccions (4) i (5) quan es donin les condicions inicials dels status de l'interval anterior al primer del període considerat, caldrà donar també el temps de marxa o atur previ de cada unitat per tal de saber si les unitats queden obligades i fins a quin interval hi queden.

4.2 La funció objectiu

La finalitat de l'assignació d'unitats és trobar aquell conjunt de status $s_k^{(j)}$, $k=1, \dots, Nt$, $j=1, \dots, Ni$ i els valors de les generacions $p_k^{(j)}$, $k \in M_j$, $j=1, \dots, Ni$ que tot satisfent les constriccions (1-5) minimitzin la despesa en combustibles al llarg dels Ni

interval·s del període d'optimització.

Hi ha dos conceptes pels quals s'origina despesa. Un és la generació amb els seus costos proporcionals a la potència generada

$$G = \sum_{j=1}^{N_i} \sum_{k \in M_j} c_k p_k^{(j)} \quad (6)$$

L'altre són les engegades i aturades, les quals consumeixen i desaprofiten respectivament una certa quantitat de combustible. El cost d'una engegada de la unitat k a l'interval j serà:

$$e_k^{(j)} = f_k (1 - \exp(-h_k t a_k^{(j)})) \quad (7)$$

on f_k és el cost d'engegada en fred i h_k el coeficient de refredament amb el temps de la unitat tèrmica k . El conjunt de les engegades de totes les unitats al llarg dels N_i intervals constitueixen el cost total de les engegades E . Es tracta doncs de minimitzar $G+E$ respecte a tots els status $s_k^{(j)}$ i les potències $p_k^{(j)}$. Cal notar tanmateix que mercès a les hipòtesis simplificadores descrites a l'apartat 2, per a un interval j , donades la càrrega CT_j , la reserva giratòria RG_j , i una assignació per a aquest interval $s_k^{(j)}$, $k=1, \dots, N_t$, les potències generades $p_k^{(j)}$, $k \in M_j$ queden determinades, encara que no de forma immediata degut a la satisfacció de la restricció (3).

Per eficiència computacional no es fa servir una fórmula amb un exponencial com la (7) -- ans una expressió més senzilla que l'aproxima /4/

$$e_k^{(j)} = f_k \left(2 - \frac{h_k'}{h_k' t a_k^{(j)}} - \frac{h_k''}{h_k'' + t a_k^{(j)}} \right) \quad (8)$$

on h_k' i h_k'' defineixen la forma de la corba de variació del cost d'engegada com indica la figura 2.

5. RESOLUCIÓ PER BIFURCACIÓ ACOTADA

La bifurcació acotada (b.a.) és un algorisme per a resoldre problemes d'optimització on part o totes les variables prenen valors discrets. La idoneïtat de l'aplicació de la b.a. depèn de les característiques del problema.

QÜESTIÓ - v.2, n°2 (juny 1978)

5.1 La tècnica de la bifurcació acotada

Donat un problema d'optimització amb variables discretes, aquest es podrà resoldre -- per b.a. si hom pot trobar acotacions superior i inferior al valor de la funció objectiu a optimitzar quan part de les variables discretes estan indeterminades no havent -- pres encara un valor discret donat.

Per a aplicar la b.a. cal emmagatzemar les provatures (valors discrets donats a un conjunt de les variables) junt amb les acotacions superior i inferior trobades a llurs components valors de la funció objectiu, i anar ampliant el conjunt de les variables -- discretes determinades de cada provatura explorant tots els casos possibles de solució, fins a arribar a tenir determinat tot el -- conjunt de les variables discretes, en el -- qual cas, en no haver-hi indeterminacions, les cotes superiors i inferiors han de ser coincidents. D'aquesta metodologia se'n poden deduir les conseqüències següents:

- A mida que hom vagi reduint el conjunt de les variables discretes sense determinar d'una provatura, les cotes superior i inferior es van atansant, quedant sempre entre les acotacions superior i inferior de la mateixa provatura amb menys -- variables discretes determinades.
- Si estem minimitzant una funció objectiu podrem eliminar de consideració i emmagatzemament totes les provatures les cotes inferiors de les quals estiguin per sobre de la cota superior d'una altra provatura (que anomenarem eliminadora), i -- viceversa per a la maximització.

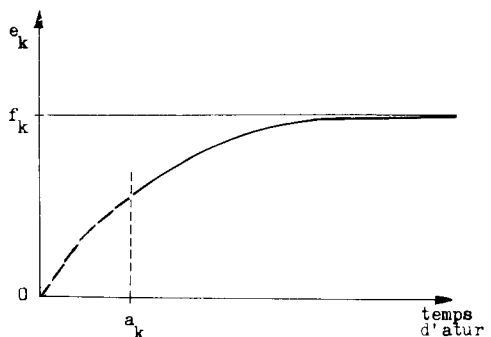


Fig. 2.
Evolució del cost d'engegada amb el temps d'atur previ

- c) També hauran de ser eliminades aquelles -- provatures que resultin en violació de -- constriccions.
- d) La determinació d'una certa variable discreta indeterminada pot fer-se donant a -- aquesta variable cadascun dels possibles valors discrets de la variable, per tant aquesta determinació farà que, de la provatura que encara no té aquesta variable determinada se'n bifurquin tantes provatures diferents amb la variable sencera determinada com valors pot prendre aquesta variable; naturalment no seran retingudes les provatures eliminables per la raó descrite c) ni les que resultin que es puguin eliminar pel procediment descrit a -- b).
- e) El procés s'acabarà amb totes les variables de les provatures determinades, havent explorat i eliminat totes les provatures possibles llevat de la que conté la combinació de valors discrets òptima compatible amb les constriccions, la qual és la solució.
- f) Cal tenir molt present que l'eliminació -- de provatures pel procés b) comporta un -- risc si la provatura eliminadora no té totes les variables discretes determinades, ja que podria resultar que en determinar-les, totes les possibilitats que se'n derivessin donessin lloc a provatures infactibles per la causa c), amb el qual podríem haver eliminat solucions factibles per una d'aparentment millor però infactible.

Quan les variables discretes són binàries, -- la bifurcació múltiple de cada determinació d'una variable discreta de les provatures, -- passa a ser una bifurcació simple a 0 o a 1, el qual té evidents avantatges d'organització computacional.

5.2 Justificació de la metodologia escollida

Les constriccions (1-5), les quals són funció o conseqüència dels valors que prenen -- els status binaris marxa/atur de les unitats, poden ser comprobades sense dificultat per a cada provatura de status d'unitats als diferents intervals. Cal remarcar que no cal si-

nó aplicar les fórmules (1-5) per a les dis-- tintes provatures i retenir-les si cap constricció és violada, o rebutjar-les si alguna o diverses de les constriccions són violades.

Hi ha mètodes de programació sencera /9/ basats en successives resolucions de programació lineal continua. Cal però recordar que aquests mètodes no comproven constriccions amb uns status donats, sinó que amb unes -- constriccions formulades donades, tracten -- de trobar uns status. Naturalment aquests -- mètodes només poden operar amb constriccions i funció objectiu lineal, el qual no és el cas de l'assignació d'unitats a causa si -- més no de (3) i (7-8), a part de les constriccions (4) i (5) que no admet la programació lineal standard i que haurien de ser considerades com a conjunt especial de variables /13/ quedant doncs els mètodes basats en la programació lineal severament limitats com a eines d'optimització a l'assignació d'unitats.

5.3 L'acotació de la funció objectiu

Una operació essencial en els algorismes de b.a. és l'acotació de la funció de cost de les provatures parcialment determinades. -- Tal com s'exposa a l'apartat 4.2, dos components independents sumats formen el cost de l'explotació tèrmica. Hi ha un procediment d'integrar els dos components /10/ però no ofereix garanties per a una veritable acotació.

El procediment triat per al mètode de solució que es presenta consisteix a separar el càlcul de les acotacions superior i inferior del cost de generació (6) i el del cost de les engegades (8), i considerar com a cota superior la suma de les corresponents cotes superiors, i com a cota inferior la suma de les cotes inferiors. No cal ni dir que el -- cas d'assignació de cota superior de generació pot ser incompatible amb el de cota superior d'engedada, però poder-ho determinar suposaria la resolució d'un problema paral·lel d'assignació d'unitats, i per tant, -- tractar d'atansar més les acotacions superior i inferior provocaria un increment -- prohibitiu de l'esforç computacional.

L'acotació del cost de generació es fa interval a interval on hi ha alguna o totes les unitats indeterminades. L'acotació inferior s'obté no considerant-ne en marxa cap o només les necessàries més barates segons l'ordre de mèrit, de les indeterminades. A l'acotació superior es prenen totes les indeterminades en marxa o el grup més nombrós possible de les més cares segons l'ordre de mèrit, per a satisfer la constricció (2).

L'acotació del cost d'engegades es fa unitat a unitat, considerant-ne els intervals amb assignació indeterminada. Donada una certa unitat es considera el màxim nombre d'engegades possibles, i dins de les possibles les que comportin més temps previ d'atur, compatibles amb les constriccions (4) i (5), com a cota superior, i cap engegada ni parada llevat de les forçades com a cota inferior.

5.4 La projecció endavant de les assignacions

Les constriccions (5) i (6) obliguen status futurs de les unitats que tenen un canvi de status a les unitats i intervals objecte d'ampliació de les determinacions de variables discretes de les provatures, amb el qual es redueix el nombre de variables indeterminades i s'atansen les acotacions superior i inferior del corresponent valor de la funció objectiu. És doncs essencial que el programa, en determinar noves variables de les provatures obligui tots els status que es derivin de les constriccions (5) i (6), eliminant aquelles provatures en que els status obligats provoquin violació de constriccions.

Per altra part és sempre útil, mitjançant un programa apart basat en procediments heurístics, de trobar, a partir de provatures parcials, una assignació factible (que compleixi totes les constriccions) total, amb el cost de la qual es pot aplicar sense risc a les provatures l'eliminació pel procediment b) esmentat a l'apartat 5.1. Malauradament això no és sempre possible ja que els mètodes heurístics no garantitzen l'obtenció d'assignacions factibles.

5.5 El despatxament òptim als intervals -- assignats

Donat un interval al qual hi ha un conjunt d'unitats determinades per a satisfer la càrrega (2) i la reserva giratoria (3), el problema de calcular quines potències ha de generar cada unitat de manera que s'optimitzi una certa funció objectiu (cost de generació) s'anomena despatxament òptim /14/. En el cas del mètode d'assignació presentat per bifurcació acotada, aquest despatxament òptim queda força simplificat mercès a les hipòtesis explicades a l'apartat 2. Amb tot, és encara necessari un mòdul de càlcul que serà tant més complicat com més constriccions del tipus (2) i (3) s'hi imposin. Aquest mòdul és el que requereix el principal component del temps de càlcul de l'assignació, ja que és el que més gran embalum té d'operacions en coma flotant, i és un pas obligat de tota prova d'assignació factible.

6. ORGANITZACIÓ COMPUTACIONAL DE LA BIFURCACIÓ ACOTADA EN PRESENCIA DE MEMÒRIA LIMITADA

En un petit problema d'assignar 5 unitats durant 24 intervals horaris, s'haurien de determinar 120 status marxa/atur de les unitats. El nombre de possibles combinacions de status fóra 2^{120} . Malgrat que se n'eliminaria una molt gran proporció, es comprèn que es puguin assolir xifres de provatures a retenir que sobreixin la capacitat de memòria del computador utilitzat.

6.1 Emmagatzemament de provatures i acotacions

Una provatura té, a efectes d'emmagatzemament a memòria, dues parts:

- a) les assignacions de status anteriorment determinats, i
- b) les dues branques en que es bifurca cada provatura en determinar el status d'una nova assignació.

Cal tenir present que la part a) requereix la memòria necessària per a emmagatzemar-la codificada i prou, però la part b) requereix a més l'emmagatzemament paral·lel de les --

acotacions superior i inferior del valor del cost corresponent a cada branca bifurcada.

6.2 Codificació binària de les provatures i codificació numèrica de les acotacions

En el cas de variables discretes binàries, - que és el de l'assignació d'unitats, poden - codificar-se les provatures bit a bit aprofitant les paraules de memòria disponible. -- D'aquesta manera, p.e.: en una paraula de 16 bits hom pot emmagatzemar 15 status ordenats; així, una provatura amb 100 status determi-- nats quedaria representada per 6 paraules to talment codificades més una paraula amb no-- més 10 dels seus 15 bits útils codificats.

Seguint amb l'exemple anterior, quan d'aques ta provatura se n'ampliï en un el nombre de status determinats, haurem de preveure la -- possibilitat de marxa (un nou bit a 1), i la d'atur (un nou bit a 0) de la paraula amb 10 bits codificats, cal doncs disposar de dues paraules amb 11 bits codificats en comptes - de l'anterior amb 10 bits codificats. No cal dran dues paraules sinó només una o cap, si només una de les possibilitats o cap resulta factible d'acord amb els punts b) i c) de -- l'apartat 5.1.

Puig que de cada provatura n'hem d'emmagatze mar les acotacions superior i inferior, hau rem de preveure, per a cada paraula contenint els darrers status codificats, dues paraules paral.leles contenint les acotacions superior i inferior a llur valor de la funció objec-- tiu. No cal ni dir que si hom emmagatzemés - les acotacions en números reals, la memòria per aquest concepte es duplicaria. L'increm ent de precisió assolida no justifica però l'extra-memòria.

L'espai de treball mínim necessari és doncs compost per:

- . un vector de dimensió N_c contenint les pa raules totalment codificades corresponents a les distintes provatures
- . un vector de dimensió N_p contenint les pa raules parcialment codificades correspo-- nents als darrers status assignats de cada provatura
- . dos vectors de dimensió N_p contenint les - acotacions superior i inferior de les pro-

vatures.

Cada vegada que s'arriba a tenir codificats tots els bits utilitzables de les paraules parcialment codificades, s'hauran d'integrar aquestes en el vector de paraules totalment codificades ampliant convenientment la di-- mensió N_c . Cal llavors recomençar amb N_p -- igual al nombre de provatures actuals, i co mençar omplenant el primer dels bits de ca da paraula parcialment codificada amb el -- nou status marxa/atur que es determini.

És palès que, en arrencar d'un origen comú, moltes provatures tenen iguals part de les primeres paraules que les codifiquen. És -- doncs necessari, per eficiència en l'emmagat zemament, dissenyar un sistema jerarquitzat d'ordenació de les paraules codificades, co munes a més d'una provatura.

6.3 Emmagatzemament dels costos dels despat xaments òptims dels intervals assignats de les provatures

La determinació de les acotacions superior i inferior implica trobar els costos de ge neració de cada interval, i aquests, la re solució del despatxament òptim de cada in-- terval totalment assignat a fi d'obtenir la distribució de generació, (la qual no s'em magatzema per a cada status de marxa de ca da provatura per obvies raons d'espai). Ca da càlcul d'acotació implica doncs la repe tició de nombrosos càlculs anteriorment -- efectuats, llevat de que, sacrificant una - part de la memòria disponible, s'emmagatze min els costos acumulats dels despatxaments òptims dels intervals completament assignats de cada provatura, amb el qual s'estalvia - una considerable quantitat de temps de càl cul. La dimensió del vector és doncs N_p i - s'emmagatzema, per precisió, en valor real, ocupant doncs $2N_p$ paraules (suposant que -- una variable real ocupi dues paraules).

L'espai de treball conjunt pels tres concep tes esmentats a l'apartat 6.2, i pel concep te ara descrit, per a tractar les provatures és doncs:

$$\text{memòria provatures} = (N_c + 5N_p) \text{ paraules} \quad (9)$$

d'on hom pot deduir fàcilment donada una --

certa quantitat de memòria disponible, quins valors màxims \bar{N}_c i \bar{N}_p poden arribar a donar-se a N_c i N_p . L'experiència adquirida mostra que una proporció aconsellable entre les dimensions de \bar{N}_c i \bar{N}_p és de l'ordre de \bar{N}_c/\bar{N}_p - entre els 3/4 i els 3/5 per a problemes d'assignació d'unitats de fins a uns 150 status binaris a determinar.

6.4 La necessitat de la truncació del nombre de provatures

Donat \bar{N}_p res no ens garanteix que, en efectuar bifurcacions a les assignacions parcials per a incorporar noves determinacions de status, no es superi el nombre de paraules \bar{N}_p , en el qual cas la memòria disponible resultaria insuficient.

És però possible, a risc de perdre assignacions òptimes i factibles, de retenir només un nombre limitat de provatures quan el total d'aquestes assoleixi un nombre determinat. Aquest nombre per raó d'organització de programes, ha de ser $\bar{N}_p/2$ ja que la següent assignació que s'explora, en tenir la possibilitat de duplicar els cassos possibles, arribaria a omplenar exactament \bar{N}_p . Així s'instaura en el programa la possibilitat de truncar les provatures que resultin en excés de $\bar{N}_p/2$ segons un criteri de valor de cost - probable calculat partint dels valors de les acotacions superior i inferior de cada provatura.

7. APLICACIÓ PRÀCTICA DE LA METODOLOGIA PRESENTADA

S'ha utilitzat un programa, basats en els principis descrits als apartats anteriors, per a resoldre per b.a. l'assignació d'unitats tèrmiques de diversos exercicis pràctics, incloent tots els tipus de constriccions esmentats llevat dels del tipus e) de l'apartat 4, emprant un minicomputador Hewlett-Packard 21MX amb 32K paraules de 16 bits de memòria de les quals només 26K són hàbils, (el temps mig per una multiplicació en coma flotant és d'uns 50 microsegons). A través d'una anàlisi dels resultats obtinguts es descriuen les necessitats de memòria, l'actuació en temps de càlcul, i el comportament del programa.

7.1 Reducció en el nombre de status a determinar en l'assignació d'unitats tèrmiques

Si s'examina el problema d'assignar 7 unitats tèrmiques durant 48 intervals d'una hora que mostra la figura 3, hom pot observar que donada l'evolució de la càrrega i les capacitats dels generadors que indica la taula 1, és fàcil deduir que les tres primeres unitats en l'ordre de mèrit han d'estar sempre en marxa, i que durant forces intervals de càrrega alta també ha d'estar en marxa la quarta i fins i tot d'altres encare més avall en l'ordre de mèrit. Pel mateix raonament i en virtut de l'experiència adquirida en l'ús d'un algorisme d'assignació d'unitats, es veuria com pot prescindir-se, sense detriment de la factibilitat i l'optimalitat de les solucions, de les unitats més cares dins de l'ordre de mèrit als intervals de més baixa càrrega. Hom pot d'aquesta manera forçar els status de forces unitats a marxa i a atur en la pràctica totalitat dels intervals, reduint així el nombre de status a determinar.

A la figura 3 hom distingeix els status forçats perquè porten un 1000 afegit al status 1 (marxa) ó 0 (atur). També s'hi observa que els primers status de les unitats 4 i 6 estan obligats a marxa i atur respectivament pel temps mínim de marxa i d'atur i el nombre d'intervals de marxa i d'atur previs al primer interval. Hi ha un atur forçat de 12 hores de la unitat 5.

La solució a aquest problema està constituïda pels status 0 (atur) i 1 (marxa) que apareixen a les corresponents files d'interval i columnes d'unitats, i per les generacions de les unitats assignades a marxa que apareixen al costat dret de la mateixa figura.

7.2 Requeriments de memòria i espais de treball de l'assignació d'unitats per bifurcació acotada

La memòria total requerida pel programa té dos components principals, la que prenen les instruccions compilades del programa, i la que pren l'espai de treball i variables utilitzats. La part més important d'aquest darrer són els vectors per a emmagatzemar -

les provatures descrits als apartats 6.2 i - 6.3.

La memòria que prenen les instruccions del programa, el qual està escrit en Fortran IV, és de poc més de 15K paraules de 16 bits. -- L'espai de treball pot calcular-se segons la fórmula:

$$\text{memòria espai treball} = 13Nt + Ni(4+Nt) + Nc + 5Np \text{ (paraules de 16 bits)} \quad (10)$$

sent els dos darrers sumands les paraules -- per a l'emmagatzemament de les provatures, - els quals tenen absoluta preponderància so--

bre el total (8400 paraules sobre un total d'espai de treball de 9263 paraules, per a l'exemple de 7 unitats i 48 intervals amb - $Nc=900$ i $Np=1500$ paraules de 16 bits).

7.3 El temps de càlcul i el creixement del nombre de provatures en l'assignació per bifurcació acotada

El temps de càlcul de la resolució per bifurcació acotada varia principalment però -- no exclusiva, amb el nombre de status a determinar segons mostra la taula. Les assignacions que donen lloc a més provatures, i

m_k/a_k		812	812	909	810	709	709	506								
<0: hores marca		-96	-96	-24	-6	-8	6	7								
>0: hores atur																
CT _j	RG _j	j	G 1	G 2	G 3	G 4	G 5	G 6	G 7	P 1	P 2	P 3	P 4	P 5	P 6	P 7
7.76	1.80	1	1001	1001	1001	1001	0	1000	0	3.20	2.56	1.00	1.00	.00	.00	.00
7.09	1.80	2	1001	1001	1001	1001	0	1000	0	3.20	1.89	1.00	1.00	.00	.00	.00
6.76	1.80	3	1001	1001	1001	1	0	1000	0	3.20	1.56	1.00	1.00	.00	.00	.00
6.56	1.80	4	1001	1001	1001	1	0	0	0	3.20	1.36	1.00	1.00	.00	.00	.00
6.54	1.80	5	1001	1001	1001	1	1000	0	0	3.20	1.34	1.00	1.00	.00	.00	.00
6.69	1.80	6	1001	1001	1001	1	1000	0	0	3.20	1.49	1.00	1.00	.00	.00	.00
7.96	1.80	7	1001	1001	1001	1	1000	0	0	3.20	2.60	1.16	1.00	.00	.00	.00
10.51	2.38	8	1001	1001	1001	1	1000	1	0	2.90	2.56	2.40	2.25	.00	.40	.00
11.11	2.52	9	1001	1001	1001	1	1000	1	1	2.86	2.56	2.40	2.40	.00	.69	.20
10.91	2.47	10	1001	1001	1001	1	1000	1	1	2.91	2.56	2.40	2.40	.00	.44	.20
10.57	2.39	11	1001	1001	1001	1	1000	1	1	2.99	2.56	2.40	2.02	.00	.40	.20
10.64	2.41	12	1001	1001	1001	1	1000	1	1	2.97	2.56	2.40	2.11	.00	.40	.20
10.47	2.37	13	1001	1001	1001	1	1000	1	1	3.01	2.56	2.40	1.90	.00	.40	.20
10.67	2.42	14	1001	1001	1001	1	1000	1	1	2.96	2.56	2.40	2.15	.00	.40	.20
11.04	2.50	15	1001	1001	1001	1	1000	1	1	2.88	2.56	2.40	2.40	.00	.60	.20
10.91	2.47	16	1001	1001	1001	1	1000	1	1	2.91	2.56	2.40	2.40	.00	.44	.20
11.11	2.52	17	1001	1001	1001	1	1	1	1	3.20	2.72	2.40	1.59	.60	.40	.20
11.31	2.56	18	1001	1001	1001	1001	1	1	1	3.20	2.68	2.40	1.83	.60	.40	.20
11.04	2.50	19	1001	1001	1001	1001	1	1	1	3.20	2.74	2.40	1.50	.60	.40	.20
10.57	2.39	20	1001	1001	1001	1001	1	1	1	3.20	2.85	2.32	1.00	.60	.40	.20
10.44	2.36	21	1001	1001	1001	1001	1	1	0	3.20	2.78	2.40	1.06	.60	.40	.00
10.10	2.29	22	1001	1001	1001	1001	1	1	0	3.20	2.85	2.05	1.00	.60	.40	.00
9.50	2.15	23	1001	1001	1001	1001	1	1	0	3.20	2.99	1.31	1.00	.60	.40	.00
9.20	2.08	24	1001	1001	1001	1001	1	1	0	3.20	3.00	1.00	1.00	.60	.40	.00
8.90	2.02	25	1001	1001	1001	1001	1	1	0	3.20	2.70	1.00	1.00	.60	.40	.00
8.16	1.85	26	1001	1001	1001	1001	1	1	0	3.20	1.96	1.00	1.00	.60	.40	.00
7.50	1.80	27	1001	1001	1001	1001	1	1	0	3.20	1.30	1.00	1.00	.60	.40	.00
7.10	1.80	28	1001	1001	1001	1001	1	1	0	2.90	1.20	1.00	1.00	.60	.40	.00
6.70	1.80	29	1001	1001	1001	1001	1	1	0	2.50	1.20	1.00	1.00	.60	.40	.00
7.60	1.80	30	1001	1001	1001	1001	1	1	0	3.20	1.40	1.00	1.00	.60	.40	.00
8.57	2.09	31	1001	1001	1001	1001	1	1	0	3.20	2.37	1.00	1.00	.60	.40	.00
11.10	2.61	32	1001	1001	1001	1001	1	1	0	3.17	2.56	2.40	1.97	.60	.40	.00
12.41	2.81	33	1001	1001	1001	1001	1	1	0	2.97	2.56	2.40	2.40	1.68	.40	.00
12.55	2.84	34	1001	1001	1001	1001	1	1	0	2.94	2.56	2.40	2.40	1.85	.40	.00
12.25	2.77	35	1001	1001	1001	1001	1	1	1	3.11	2.56	2.40	2.40	1.18	.40	.20
12.05	2.73	36	1001	1001	1001	1001	1	1	1	3.15	2.56	2.40	2.40	.94	.40	.20
12.05	2.73	37	1001	1001	1001	1001	1	1	1	3.15	2.56	2.40	2.40	.94	.40	.20
12.45	2.82	38	1001	1001	1001	1001	1001	1001	1	3.06	2.56	2.40	2.40	1.43	.40	.20
12.51	2.83	39	1001	1001	1001	1001	1001	1001	1	3.05	2.56	2.40	2.40	1.50	.40	.20
12.65	2.86	40	1001	1001	1001	1001	1001	1001	1001	3.02	2.56	2.40	2.40	1.67	.40	.20
13.25	3.00	41	1001	1001	1001	1001	1001	1001	1001	2.88	2.56	2.40	2.40	2.00	.81	.20
13.05	2.95	42	1001	1001	1001	1001	1001	1001	1001	2.93	2.56	2.40	2.40	2.00	.56	.20
12.41	2.81	43	1001	1001	1001	1001	1001	1001	0	2.97	2.56	2.40	2.40	1.68	.40	.00
12.15	2.75	44	1001	1001	1001	1001	1	1	0	3.03	2.56	2.40	2.40	1.36	.40	.00
11.75	2.71	45	1001	1001	1001	1001	1	0	0	2.83	2.56	2.40	2.40	1.56	.00	.00
11.34	2.68	46	1001	1001	1001	1001	1	0	0	2.86	2.56	2.40	2.40	1.12	.00	.00
10.80	2.50	47	1001	1001	1001	1001	1	0	0	3.04	2.56	2.40	2.20	.60	.00	.00
9.04	2.27	48	1001	1001	1001	1001	0	0	0	2.77	2.56	2.40	1.31	.00	.00	.00

Fig. 3. Exemple d'assignació de 7 unitats tèrmiques a 48 intervals (problema I)

Taula 1.
Característiques dels generadors tèrmics del problema I.

k	\bar{p}_k (MW)	\underline{p}_k (MW)	c_k (COST/MW)	f_k (COST)	h'_k (TEMPS)	h''_k (TEMPS)	a_k (HORES)	m_k (HORES)	v_k --	w_k --
1	320	120	0,19	4,	1,679631	0,5953688	12	8	0,2	1,
2	320	120	0,195	4,	1,679631	0,5953688	12	8	0,2	1,
3	300	100	0,21	3,2	1,679631	0,5952688	9	9	0,2	1,
4	300	100	0,315	3,4	1,679631	0,5953688	10	8	0,2	1,
5	250	60	0,23	2,6	1,679631	0,5953688	9	7	0,2	1,
6	120	40	0,25	2,	1,679631	0,5953688	9	7	0,2	1,
7	50	20	0,28	1,3	1,679631	0,5953688	6	5	0,2	1,

Taula 2.
Dimensions dels problemes i temps d'execució.

Problema	Nt	Ni	Status a determinar	Generacions a determinar	Temps d'execució
I	7	48	129	321	4h.16'39"
II	5	48	144	240	3h. 0'17"
III	11	24	108	247	2h.57' 8"
IV	5	12	44	57	15'42"

(Execucions en un minicomputador Hewlett-Packard 21MX)

per tant a més temps de càlcul, són les de status d'unitats de poca capacitat i de curt temps mínim de marxa i d'atur, és a dir, de les que solen ser més cares d'operació i que per tant estan als darrers llocs de l'ordre de mèrit. No basta doncs de donar un nombre de status a assignar per a preveure el volum del problema, cal analitzar a quin tipus d'unitat corresponen majoritàriament els status a assignar.

Un fet molt remarcable és que amb les acotacions al valor del cost emprades, les eliminacions de provatures pel procés b) de l'apartat 5.1 no comencen a fer-se sentir fins que les provatures tenen ja un 80% dels status determinats tot i considerar, de bon començament, provatures eliminadores subòptimes totalment assignades. Com a cas típic, el problema IV de la taula 2, exemple representatiu d'aquest fet degut a que N_p no arriba a créixer prou per a que es fagi necessari truncar. No hi ha la primera eliminació per la causa esmentada fins a la determinació del 20é. status (dels 44 a determinar), i el nombre d'eliminacions per aquest concepte no arriba a ser una fracció significativa de N_p fins a l'assignació del 37é. status (dels 44 totals a determinar).

Aquest comportament és pràcticament coincident als altres exemples analitzats, amb la diferència que als més grossos com els I, II, i III, N_p ja ha crescut fins al seu límit màxim quan només hi ha assignat entre el 20 i el 25% dels status a determinar, -- realitzant-se des d'aleshores truncacions -- en el nombre de provatures en més d'un terç de les determinacions que manquen per a completar la resolució.

L'evolució del temps de càlcul segons el nombre de status assignats, és mostrada a la figura 4 per als problemes I i II.

Resulta també interessant de seguir el procés de l'optimització i a través de les successives determinacions de status. Al començament de l'exemple I, el programa heurístic de trobar assignacions (veure l'apartat 5.4) va fallar en tractar de trobar una assignació factible. Després de la 45a. determinació de status, partint de les provatures existents, el programa heurístic trobà una assignació factible de cost 1015,915. Després de la 105a. determinació el programa heurístic trobà una assignació sub-òptima de cost 1010,86. I finalment la solució per b.a. després de determinar els 129 sta-

tus, té un cost de 1010,844.

Cal tenir en compte tanmateix que aquestes - petites diferències porcentuals entre solu- cions sub-òptimes i la solució òptima, apli- cades al preu de generar els gairabé 48000 - MW-H que representa el problema I, té prou - importància per a justificar l'esforç compu- tacional d'optimització.

8. CONCLUSIONS

S'ha presentat una metodologia per a resol- dre l'assignació d'unitats tèrmiques, les di- ficultats trobades, i els resultats obtin- guts en portar-la a la pràctica.

En no ser efectiva l'eliminació de provatu- res per cost, com és típic de la b.a., el -- nombre de provatures creix, i cal recórrer a la truncació de les provatures emmagatzema- des per tal de resoldre els problemes amb -- una capacitat de memòria disponible limitada.

L'actuació en temps de càlcul resulta lenta si be amb la metodologia descrita hom pot te- nir en compte constriccions d'operació que - han de ser simplificades en altres tipus -- d'algorismes. L'ús d'un minicomputador de ca- pacitat de memòria i potència de càlcul mo- destes, es mostra suficient per a resoldre - problemes de dimensió mitja, de fins a unes 150 assignacions de status marxa/atur.

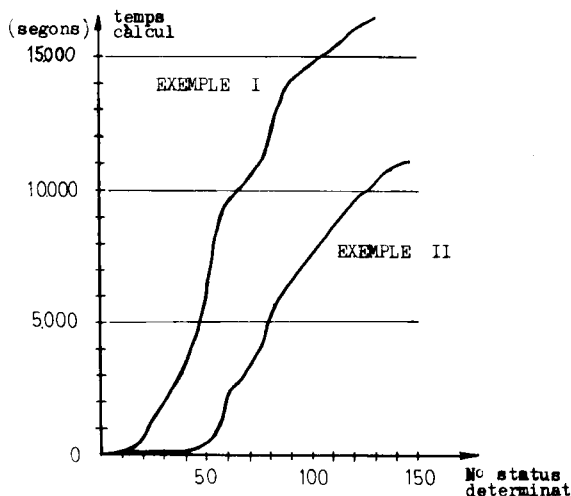


Fig. 4.
Temps de càlcul acumulats a cada
determinació de status per als
exemples I, i II

9. RECONeixEMENTS

El treball descrit a aquest article va ser desenvolupat per llurs autors mentre forma- ren part de EYSSA-Industrial de Barcelona.

10. BIBLIOGRAFIA

- /1/ VIRAMONTES, F.A. i HAMILTON, H.B. "Opti- mal long range hydro scheduling in the integrated power system". IEEE Transac- tions on PAS, v. PAS-97, 1978, pp. 292- 299.
- /2/ NABONA, N. "Gestió hidro-tèrmica proba- bilista a llarg termini de la producció elèctrica". QÜESTIÓ, v.1, nq 1, 1977, pp. 35-48.
- /3/ ENGLÉS, L., LARSON, R.E., PESCHON, J., i STANTON, K.N. "Dynamic programming -- applied to hydro and thermal generation scheduling". IEEE Tutorial course text 76 CH 1107-2-PWR, 1976, "Application of optimization methods in power system en- gineering".
- /4/ KERR, R.H., SCHEIDT, J.L., FONTANA, A.J. i WILEY, J.K. "Unit commitment", IEEE - Transaction on PAS, v. PAS-85, 1966, pp. 417-421.
- /5/ GUY, J.D. "Security constrained unit -- commitment", IEEE Transactions on PAS, v. PAS-90, 1971, pp. 1385-1389.
- /6/ LOWERY, P.G. "Generating unit commitment by dynamic programming", IEEE Transac- tions on PAS, v. PAS-85, 1966, pp. 422- 426.
- /7/ AYOUB, A.K. i PATTON, A.D. "Optimal ther- mal generating unit commitment", IEEE - Transactions on PAS, v. PAS-90, 1971, - pp. 1752,1756.
- /8/ PANG, C.K. i CHEN, H.C. "Optimal short- term thermal unit commitment", IEEE -- Transactions on PAS, v. PAS-95, 1976, - pp. 1336-1346.
- /9/ LAWLER, E.L. i WOOD, D.E. "Branch-and- bound methods: a survey", Operations -- Research, v. 14, 1966, pp. 699-719.

- /10/ DODU, J.C., MARTIN, P., MERLIN, A., i -
POUGET, J. "An optimal formulation and
solution of short-range operating pro--
blems for a power system with flow cons
traints". Proceedings of the IEEE, v. -
60, 1972, pp. 54-63.
- /11/ DILLON, T.S., EDWIN, K.W., KOCHS, H.D.,
i TAUD, R.J. "Integer programming app--
proach to the problem of optimal unit -
commitment with probabilistic reserve -
determination", IEEE P.E.S. 1978 Winter
Meeting, New York, N.Y., Estats Units,
(article F 78 265-1).
- /12/ NABONA, N., i FRERIS, L.L. "Optimum al-
location of spinning reserve by quadra-
tic programming", Proceedings IEEE, v.
122, 1975, pp. 1241-1246.
- /13/ ESCUDERO, L.F. "Conjuntos especiales en
programaci3n matem3tica", QÜESTI13, v.
2, 1978, pp. 69-78.
- /14/ NABONA, N. i FRERIS, L.L. "Optimisation
of economic dispatch through quadratic
and linear programming", Proceedings --
IEEE, v. 120, 1973, pp. 574-580.

11. APÈNDIX 1. LA RESERVA GIRATÒRIA DELS GE- NERADORS TÈRMICS

La reserva girat3ria r de la unitat t3rmica
 k , pot definir-se com la quantia de pot3ncia
activa que podria ser obtinguda de la unitat
 k a base de carregar-la a la seva m3xima ta-
sa incremental de generaci3n durant un temps
pre-especificat, (hi ha reserva girat3ria a
cinc minuts, reserva girat3ria a deu minut,
etc.), suposant ja que la unitat k est3 ja -
produïnt p . Nom3s una fracci3n limitada de -
la reserva aparent $(\bar{p} - p)$ estar3 disponible
passat el temps pre-especificat, podent-se -
determinar un sostre de reserva girat3ria --
que defineix la fracci3n v de la capacitat -
m3xima que equival al producte de la m3xima
tasa incremental de c3rrega multiplicada pel
temps pre-especificat, segons mostra la figu-
ra 5.

Un marge de seguretat w s'aplica per a trans-
formar la reserva aparent en reserva girat3-
ria per a pot3ncies generades a prop del lí-
mit de capacitat.

QÜESTI13 - v.2, n2 (juny 1978)

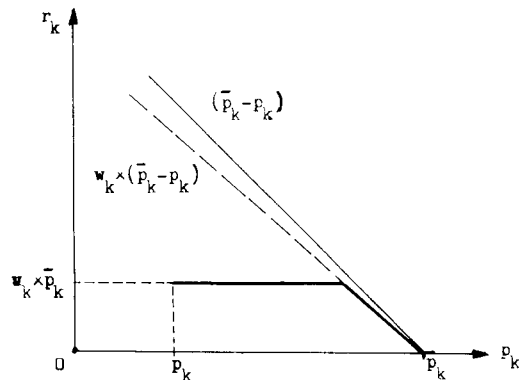


Fig. 5.
Reserva girat3ria i reserva aparent
segons la pot3ncia generada

12. NOTES

- ¹El terme angl3s "branch-and-bound" (equiva-
lent al franc3s "s3paration et 3valuation -
programm3es") s'ha fet equivaler en aquest -
treball a l'expressi3n "bifurcaci3 acotada".

