

GESTIÓ HIDRO-TÈRMICA PROBABILISTA A LLARG TERMINI
DE LA PRODUCCIÓ ELÈCTRICA

Narcís NABONA i FRANCISCO

Donada una xarxa elèctrica alimentada per centrals hidràuliques i tèrmiques, es tracta de presentar una metodologia basada en l'ús de programació dinàmica utilitzant descomposició espacial, amb part de les variables probabilístiques, per a obtenir per a cadascun dels intervals en què hom descomposa un cert període llarg de temps, les descàrregues d'aigua de cada embassament susceptibles de minimitzar el cost esperat de la producció d'origen tèrmic - al llarg del període de temps considerat. Prèviament cal haver obtingut per a cada interval una funció de variació de cost respecte a la producció total hidràulica mitjançant un programa de costos probabilístics.

Es desenvolupa i es justifica la metodologia utilitzada i es donen les dades, resultats, i requeriments computacionals d'una aplicació a un cas pràctic.

LLISTA DE SIMBOLS

- a Cabal d'aportació natural.
- B,b Vector de, i funció de volum embassat - segons cota.
- C,c Vector de, i cost de la generació tèrmica.
- g Pes atorgat a cada component del vector de cost.
- H,h Vector de, i generacions hidràuliques.
- i (supràindex) indicador d'interval.
- j (subíndex) indicador d'embassament.
- k (subíndex) indicador de component de -- probabilitat d'aportació.
- M_d Memòria requerida per les variables dimensionades i l'espai de treball.
- M_o Memòria requerida per les instruccions del programa.
- p* Una probabilitat.
- P₁₆ Paraula de 16 bits.
- R,r Vector de, i rendiments en potència generada dels embassaments segons la cota.
- U,u Vector de, i control (descàrrega) en -- l'optimització hidràulica per programació dinàmica.
- V,v Vector de, i aportació que arriba a un embassament.
- X,x Vector de, i estat (cota) en l'optimització hidràulica per programació dinàmica.

1. INTRODUCCIÓ

Per raons ecològiques i econòmiques cal optimitzar l'ús de l'aigua disponible als embassaments de les centrals hidràuliques de manera que al llarg d'un cert període de temps es minimitzi el consum de combustibles a les centrals d'origen tèrmic. Aquesta minimització significa evitar tant com sigui possible l'ús dels generadors més ineficients, és a dir, d'aquells que per MW produït consumeixen més combustible, o bé el combustible més car, o el més contaminant.

L'aigua embassada és un recurs natural privilegiat, no només perquè no té un cost -- d'ús, sinó a més perquè a diferència dels -- altres recursos naturals (vent, sol), es -- pot emmagatzemar i usar quan convingui. La mateixa aigua és utilitzada per a generar -- energia tantes vegades com embassaments encadenats hi hagi, i l'aigua pot ésser reciclada en centrals de bombeig quan això estigui justificat.

Els embassaments reben unes aportacions naturals limitades, de les quals només coneixem unes distribucions probabilístiques obtingudes per l'anàlisi estadístic de dades de cabals passats. Se suposarà disponibilitat il·limitada de combustibles per a generadors de centrals tèrmiques. La disponibi-

- N. Nabona de EYSSA.
- Article rebut el Octubre.

litat d'aquests generadors només es considerarà afectada per les panes i els perfolades de manteniment. D'una anàlisi de panes passades, i fiabilitats dels components que afecten la generació se'n deduirà una probabilitat de pana i la seva complementària -- probabilitat de servei per a cada generador.

Amb els recursos hidràulics i tèrmics disponibles cal satisfer una potència demandada no coneguda a priori, però que seguirà a cada interval de temps una corba càrrega-duració o el que és equivalent, una distribució de probabilitat acumulada que pot ésser obtinguda amb bona aproximació per un programa predictor de càrregues.

Finalment cal tenir present que els beneficis de la gestió hidrotèrmica provenen primordialment de la seva explotació racional a llarg termini, coordinada amb les explotacions a curt termini, de les quals l'optimització instantània de la producció (despatxament òptim) no n'és sinó un complement sovint inaplicable. Les optimitzacions instantànies deslligades ens menarien a consumir el màxim possible d'aigua i el mínim de tèrmic fins a exhaurir l'aigua dels embassaments, després del qual caldria confiar exclusivament en recursos tèrmics, mentre que l'optimització a llarg termini suposa trobar les dosis d'hidràulic i de tèrmic a consumir a cada interval de temps per a fer -- que la suma global dels consums tèrmics entot el període llarg d'optimització sigui -- el mínim.

Hi ha força treballs publicats sobre gestió hidro-tèrmica a llarg termini. La primera -- contribució interessant va ser la descripció d'un procediment manual semi-gràfic per a trobar els límits admissibles d'evolució de la quantitat global d'aigua embassada en tots els embassaments d'un sistema d'aprofitaments hidràulics, basat en l'ús d'unes -- corbes de regla bàsica i de regla de no vessament /1/. Aquest procediment, concebut -- abans de l'adveniment del computador per a càlculs tècnics, està limitat per tal com -- ni pot donar l'evolució desitjable de cada embassament particular, ni pot establir una relació rigorosa entre el volum global d'aigua embassada i el valor unitari de l'aigua en termes econòmics.

Quan la potència dels computadores a l'abast ho féu factible, s'introduí la programació dinàmica (p.d.) /2/ com a eina d'optimització, ja que aquesta és la tècnica que millor escau al problema a resoldre. Les primeres d'aquestes contribucions fan fonamentalment referència al problema del curt termini, o a un problema de llarg termini considerat amb variables deterministes /3 i 4/. Més endavant hom emprà una funció probabilista per a descriure les aportacions i es considera el cost probable com a funció de la generació hidràulica d'un embassament -- /5/. En el treball present s'estén la formulació a un sistema multiembassament i es fa una presentació completa del problema a llarg termini amb totes les constriccions -- possibles.

2. SIMPLIFICACIONS A L'OPTIMITZACIÓ UTÒPICA DE LA PRODUCCIÓ

No podem pretendre de realitzar una optimització total de la producció perquè no podem conèixer en forma determinista part de les variables que l'afecten i perquè, encara -- que les coneguéssim, el nombre de variables que hi intervindrien fóra excessiu per a -- les capacitats computacionals avui disponibles.

La simplificació principal que redueix el -- nombre de variables a optimitzar és la jerarquització temporal, la qual és la subdivisió de l'optimització de l'explotació dels intervals molt curts d'un període llarg en una primera suboptimització del període -- llarg en intervals no tan llargs, per a fer després amb els resultats obtinguts una segona suboptimització de cada interval no -- tan llarg en intervals curts, p.e.: en comptes d'optimitzar les produccions de cada generador hidràulic i tèrmic en les 8760 hores de l'any, optimitzem primer les produccions totals tèrmiques i la total de cada embassament en cadascuna de les 52 setmanes de l'any, i després per a cada setmana es fa una optimització dels seus 168 intervals horaris.

A l'exemple esmentat l'optimització any-52 setmanes la qualificarem de "llarg termini", mentre que les de setmana-168 hores les qualificarem de "curt termini". La diferència

genèrica entre curt o llarg termini rau en el fet d'ésser o no deterministes les dades d'aportacions naturals als embassaments, càrregues, i panes en els intervals considerats. En l'optimització a llarg termini, --any-52 setmanes, hem de considerar les aportacions i càrregues de cadascun dels 52 intervals com a sengles distribucions probabilistes, i considerar les probabilitats de pana dels generadors tèrmics, ja que no les podem conèixer d'antuvi amb prou aproximació; en canvi, en l'optimització a curt termini, setmana-168 hores, no considerem panes, i les aportacions naturals i les càrregues dels 168 intervals seran magnituds deterministes. És clar que no realitzarem una optimització a curt termini fins que no disposem d'uns valors prou fiables de les aportacions i càrregues dels intervals.

En l'optimització a llarg termini fixarem unes cotes d'aigua inicials i unes de finals per a cada embassament, i n'obtidrem per a cada embassament uns valors de cotes al final de cada interval. Dos conjunts de cotes successives obtinguts en l'optimització a llarg termini constitueixen les cotes d'aigua inicials i finals en l'optimització a curt termini de l'interval llarg comprès. -- No cal ni dir que l'estratègia òptima d'explotació que obtenim utilitzant la descomposició temporal jeràrquica pot no ser tan bona com la que obtindríem d'una optimització sense descomposició si coneguessim a priori les càrregues, aportacions i panes.

Les formes de descomposició temporal jeràrquica poden ésser múltiples, p.e.: una de --possible fóra llarg termini de 1 (o 2) any/s en 12 (o 24) mesos, amb subsegüent llarg --termini de mes en intervals de 48 hores, i després curt termini de cada grup de 48 hores en 48 intervals d'hora /4/.

3. CARÀCTER PROBABILISTA DE LES VARIABLES A LLARG TERMINI

Ja hem fet esment en diferenciar el curt i el llarg termini, d'unes variables: panes, càrregues, i aportacions hidràuliques que --no es poden fixar de manera determinista --per a un cert període futur llunyà.

3.1 El cost probable com a funció de la generació hidràulica

Són ben coneguts els algorismes a través --dels quals hom pot deduir, d'una probabilitat acumulada de càrrega corresponent a un interval de temps, i de les probabilitats --de pana, capacitats, i costos d'explotació dels generadors d'origen tèrmic disponibles en aquest interval, el cost més probable de satisfer la càrrega en aquest interval /6/. També existeix un mètode per a obtenir la --variació de l'esperança matemàtica del cost de generació en presència de distintes quantitats de generació hidràulica durant l'interval de temps considerat /5/. Aquesta generació hidràulica tant pot considerar-se --provinent d'un sol embassament /5/, com de més d'un /7/. Es palès que mentre que considerem càrregues probabilistes, obtingudes --d'un programa predictor de càrregues i probabilitats de pana podem desestimar l'efecte de la xarxa de transmissió pel que fa a pèrdues de transport.

La Figura 1 mostra unes probabilitats acumulades de càrrega corresponents a 53 intervals setmanals successius. A la Figura 2 --hom pot veure les funcions de variació del cost esperat de producció respecte a la --quantitat de generació hidràulica, d'un conjunt de generadors d'origen tèrmic, les característiques dels quals estan donades en l'Apèndix 1, corresponents a les càrregues dels 53 intervals setmanals representats a la Figura 1.

Després d'obtenir aquestes funcions podem --oblidar les càrregues i les panes, ja que --el problema d'optimitzar la producció queda reduït a trobar les generacions hidràuliques que minimitzen la suma, al llarg del --període de minimització, de les funcions de cost probable de producció de cada interval.

3.2 Aportacions i descàrregues hidràuliques dels embassaments

Donat un sistema d'aprofitaments hidràulics com el de la Figura 3, veiem que en els embassaments A, E, i F tenen una aportació natural, els cabals de les quals, expressats com a probabilitats acumulades corresponents a 53 setmanes, els podem veure a la Figura 4.

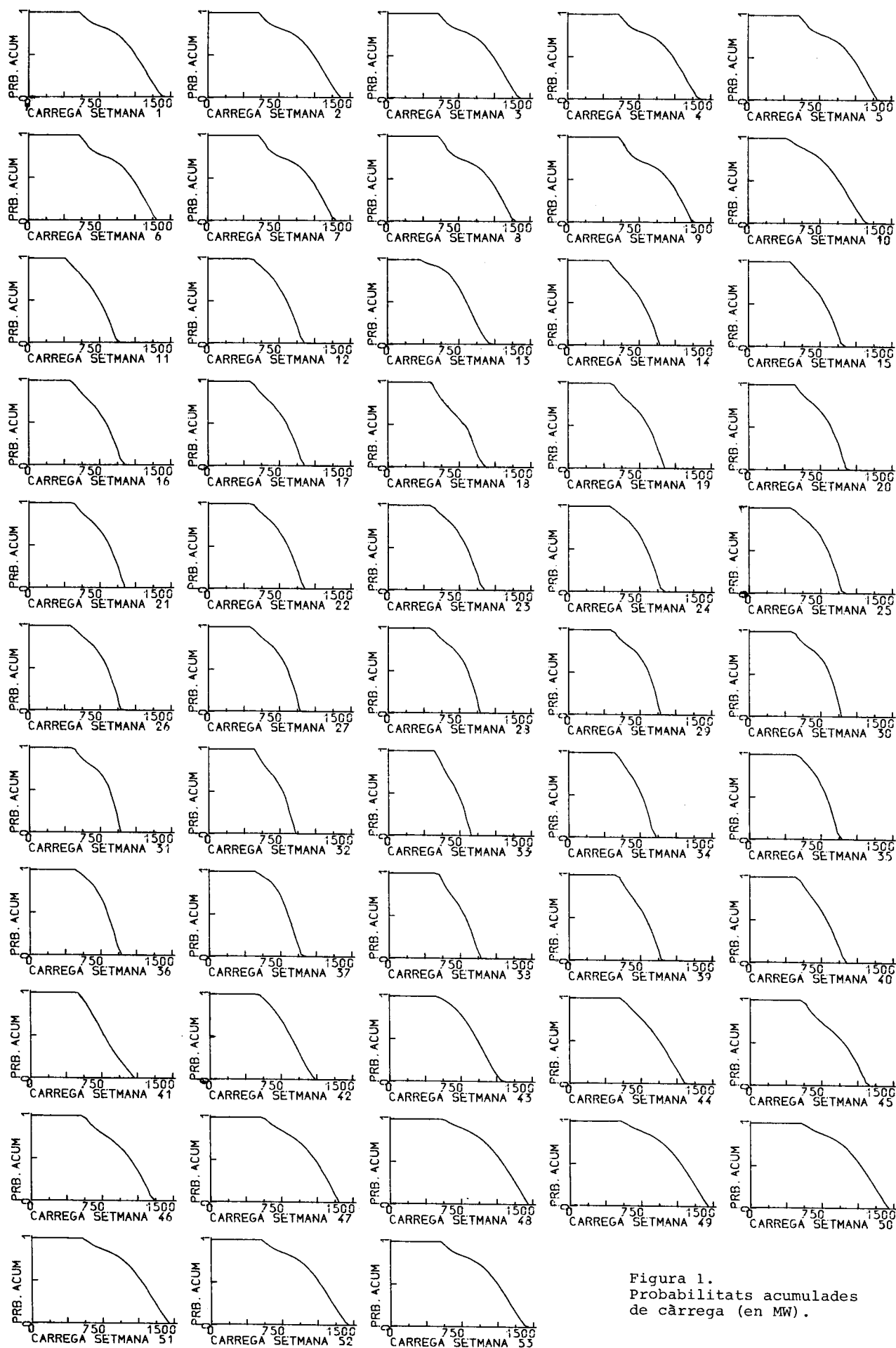


Figura 1.
Probabilitats acumulades
de càrrega (en MW).

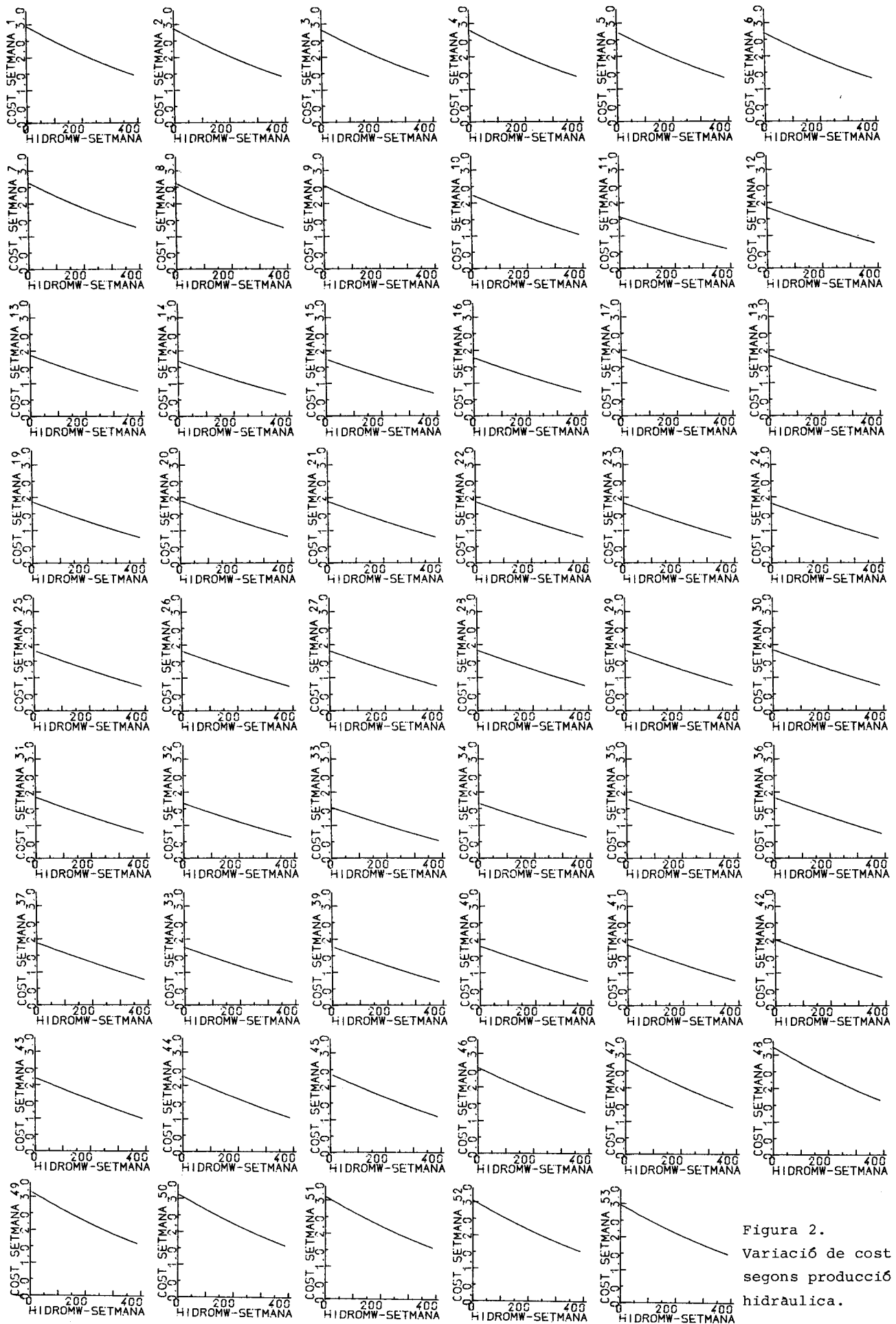


Figura 2.
Variació de cost
segons producció
hidràulica.

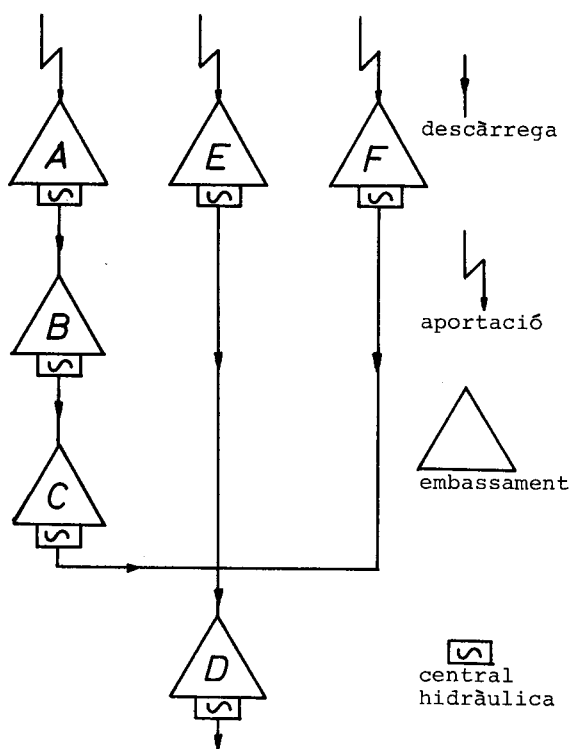


Fig. 3.
Sistema d'aprofitaments hidràulics.

En l'anàlisi probabilista de l'optimització hidràulica cal tenir en compte els següents aspectes:

- 1) En tot sistema d'embassaments encadenats com el de la Figura 3, i, en general, en tot conjunt d'embassaments pertanyent a una àrea climàtica uniforme, quan en un dels embassaments arribi un cabal d'aportació corresponent a una probabilitat p^* , als altres embassaments amb aportacions naturals hi arribarà un cabal molt pròxim al de probabilitat p^* de la seva respectiva distribució, per raó de la uniformitat climàtica.
- 2) Suposant cota d'aigua constant en un embassament (a base de descarregar tanta aigua com hi arribi) la distribució de probabilitat del cabal descarregat coincideix amb la del cabal aportat.
- 3) Suposant que les còtes d'aigua siguin constants a tots els embassaments, en els punts de confluència d'aigües els cabals resultants tindran una distribució probabilista que serà l'obtinguda de la suma dels cabals confluents corresponents a probabilitat igual.

- 4) Si suposem que en un cert interval de temps un embassament varia uniformement la seva cota entre dos valors determinats, el cabal descarregat resultant segueix la mateixa distribució probabilista que el seu cabal d'aportació llevat que els cabals corresponents a cada probabilitat portin tots igualment afegit o deduït el cabal que correspon a la quantitat d'aigua descarregada o retinguda per a fer variar la cota des del valor inicial al final, dividit per la durada de l'interval.
- 5) Rebaixar la cota sempre és físicament possible, qualsevol que sigui el cabal aportat.
- 6) Apujar la cota fins a un cert valor requereix una aportació mínima d'aigua igual al volum que suposa l'increment de cota; aquest volum, donada la durada de l'interval considerat, representa un cabal mínim per sota del qual no es pot fer efectiu el valor d'increment de cota especificat. Podem, doncs, dir que, amb una distribució de probabilitat d'aportació a un embassament determinat, a cada increment de cota hi ha associada una probabilitat límit d'aportació corresponent al cabal mínim indispensable.

4. PROGRAMACIÓ DINÀMICA I LIMITACIONS INHERENTS

La p.d. és una tècnica numèrica concebuda per tal d'optimitzar una funció dels valors que prenen en el temps una o més variables respecte als successius valors d'aquestes variables al llarg del temps, i subjecta a constriccions lligant els valors de les variables corresponents a un cert instant o corresponent a instants diferents.

Aquest és precisament el cas de l'optimització del cost de la producció, en quantitat de combustibles, valor econòmic, o contaminació produïda, respecte als valors al llarg del temps de les generacions hidràuliques en un sistema amb embassaments i generadors tèrmics.

Per raons computacionals en p.d. cal discretitzar tant les variables respecte a les

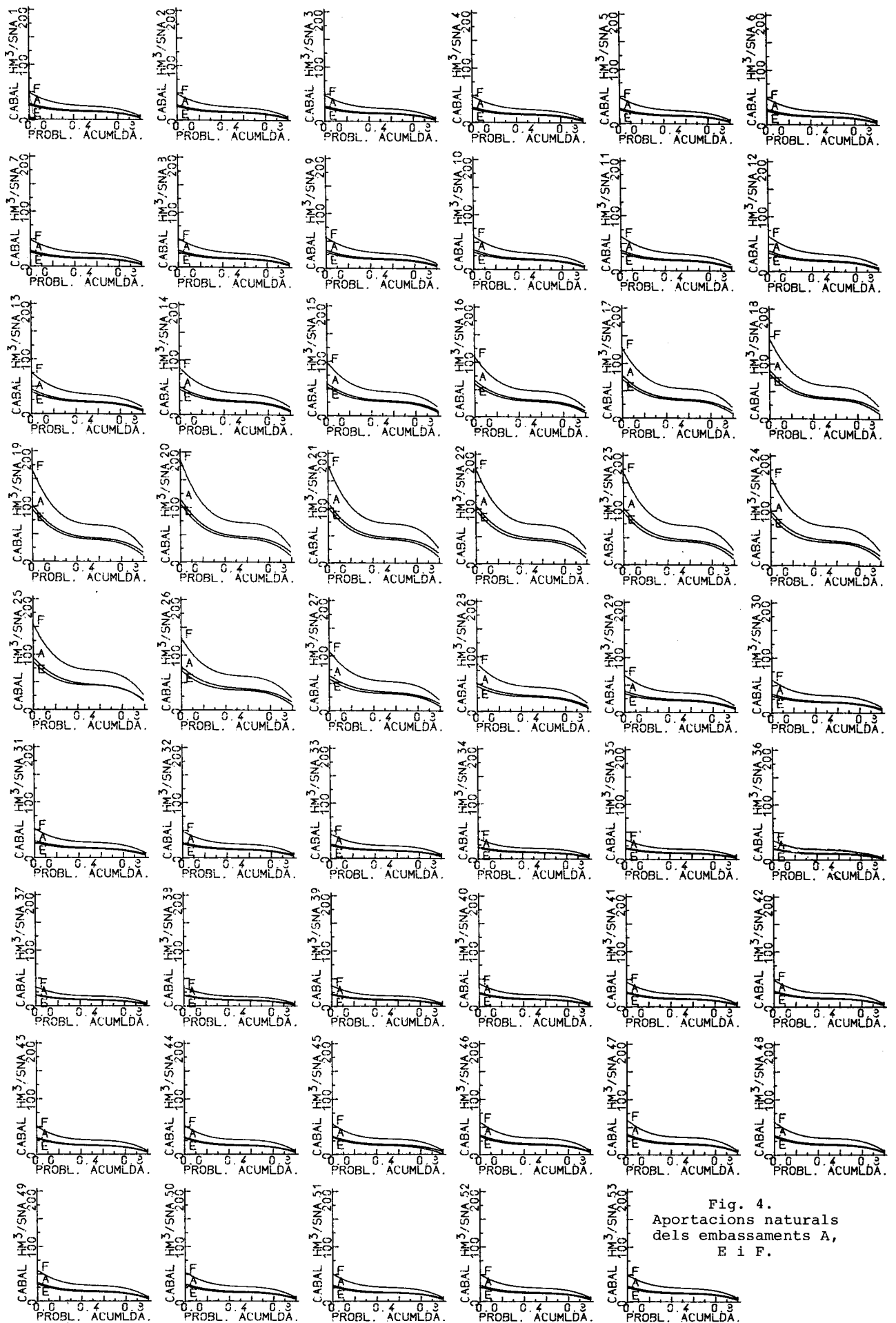


Fig. 4.
Aportacions naturals
dels embassaments A,
E i F.

quals s'optimitza, com el temps, de manera que el període d'optimització queda subdividit en un cert nombre d'interval·ls i el que s'optimitza són els valors de les variables al final de cada interval; així mateix no es permet que les variables prenguin qualsevol valor, sinó només un d'entre un conjunt limitat de valors, quantificant correntment les variables dins de llurs límits. Malgrat la simplificació que implica la discretització del temps i dels valors de les variables, la forma standard de la p.d. no permet de solucionar sense requeriments computacionals prohibitius en memòria i temps de càlcul, - problemes on intervinguin gaire més de dues o tres variables i unes desenes d'interval·ls.

Hi ha una tècnica dita de descomposició espacial /8/ o de resolucions successives /9 i 10/ que alleuja enormement els requeriments de memòria de la p.d.. Consisteix en optimitzacions successives respecte a un conjunt restringit del total de variables, variant per torn les variables que componen el conjunt restringit. Tot i que es pot provar que la sola aplicació de la descomposició espacial condueix al mateix òptim que la forma standard /11/, a la pràctica hom veu que amb l'adjunció de limitacions sobre qualsevol de les variables a la descomposició espacial, no es garanteix l'assoliment de l'òptim. Així, amb l'exemple de quatre variables de la Referència 8, es pot comprovar que la descomposició espacial agafant un grup restringit de dues variables condueix a l'òptim, però amb un grup restringit de d'una variable, no s'assoleix l'òptim, - cosa que representa un contrast d'evidència amb /8/, però que corrobora el que expressen /9 i 10/.

La p.d. ha de partir d'una estratègia factible inicial, que tracta de millorar fent proves variant els valors de les variables al voltant de la estratègia inicial o la obtinguda anteriorment. Per eficiència computacional convé de limitar la zona de prova de les variables a una faixa estreta al voltant de l'estratègia factible inicial o anterior. Ampliant l'amplària de la faixa es millora la convergència a l'òptim, però es requereix més temps per prova i més espai de treball. Nq designarà el nombre de valors discrets de variable inclosos a la faixa.

5. EQUACIONS I CONSTRICCIONS DE L'EXPLOTACIÓ HIDRÀULICA

Com a variables d'estat que defineixen la situació dels embassaments a cada interval, prendrem les cotes de l'aigua

$$x_j^{(i)}, \quad i = 0, 1, \dots, N_e \\ u = i, \dots, N_1$$

representant $x_j^{(i)}$ la cota de l'aigua de l'embassament j al final de l'interval i . El vector $X^{(i)}$ representa el conjunt

$$x_j^{(i)}, \quad j = 1, \dots, N_e$$

$X^{(0)}$ i $X^{(N_1)}$ seran l'estat inicial i final impositat respectivament.

Com a variables de control que canvien l'estat d'un interval al següent, prendrem les descàrregues d'aigua dels embassaments durant cada interval $\hat{u}_j^{(i)}$, essent el circumflex ^ indicació que la descàrrega té un valor dependent de quina de les possibles aportacions naturals $\hat{a}_m^{(i)}$ arriba als $m=1, \dots, N_a$ embassaments que en tenen, a cada interval, i $\hat{u}_j^{(i)}$ serà $\hat{u}_j^{(i)}$, $j = 1, \dots, N_e$.

Les aportacions naturals de la Figura 3 representen els cabals segons llurs probabilitats acumulades d'ocurrència. Si prenem un conjunt de N_p punts uniformement distribuïts corresponents a N_p probabilitats, podem considerar $\hat{a}_m^{(i)}$ com a aproximadament representat per la funció puntual $a_m(k)^{(i)}$ amb $k = 1, \dots, N_p$. $a_m(N_p)^{(i)}$ és el cabal de probabilitat acumulada 1, és a dir, aquell cabal mínim garantit a l'embassament amb aportació m durant l'interval i , i $a_m(k)^{(i)}$ en serà aquell que només és assolit o ultrapassat amb probabilitat k/N_p .

Representem per $\hat{v}_j^{(i)}$ l'aportació d'aigua que arriba a l'embassament j durant l'interval i . Aquesta aportació tant pot ésser aportació natural $a_m^{(i)}$ (essent el m -èsim dels N_a embassaments amb aportació el j -èsim dels N_e embassaments), com a descàrrega d'embassament o embassaments confluents aigües amunt del j ($j(c)$ n'indicarà el conjunt), $\hat{u}_{j(c)}^{(i)}$, com una suma d'ambdós $\hat{a}_m^{(i)} + \hat{u}_{j(c)}^{(i)}$ en embassaments amb aportació natural que no siguin de capçalera. $\hat{v}^{(i)}$ seran les aportacions $\hat{v}_j^{(i)}$, $j = 1, \dots, N_e$.

Podem establir que:

$$\hat{U}^{(i)} = \hat{V}^{(i)} + B(X^{(i)}) - B(X^{(i-1)}) \quad (1)$$

on B és el conjunt de funcions $b_j(x_j^{(i)})$, -- $j = 1, \dots, Ne$ que donen el volum d'aigua embassada com a funció de la cota.

El rendiment en producció elèctrica de cada unitat de volum d'aigua descarregada varia naturalment amb la cota segons el conjunt R de funcions de rendiment $r_j(x_j^{(i)})$, $i=1, \dots, Ne$ estant la generació hidràulica tanmateix limitada a un màxim de capacitat $\bar{h}_j(x_j^{(i)})$ funció de la cota

$$\hat{h}_h^{(i)} = r_j(x_j^{(i)}) \quad \hat{u}_j^{(i)} \leq \bar{h}_j(x_j^{(i)}) \quad (2)$$

$j=1, \dots, Ne$

La descàrrega en excés de

$$\bar{h}_j(x_j^{(i)})/r_j(x_j^{(i)})$$

no és aprofitada per generació a la central de l'embassament j , però pot ésser aprofitada a d'altres embassaments aigües avall.

El total de la generació hidràulica a cada interval serà:

$$\hat{H}^{(i)} = \sum_j^{Ne} \hat{h}_j^{(i)} \quad i = 1, \dots, Nl \quad (3)$$

i el cost de la generació tèrmica trobat de les funcions de variació de cost amb la generació hidràulica:

$$\hat{C} = \sum_i^{Ni} C^{(i)}(\hat{H}^{(i)}) \quad (4)$$

No hi ha cap dificultat a incloure funcions de pèrdua d'aigua per evaporació en funció de la cota, o funcions de fuga d'aigua, aigües avall de l'embassament a causa de filtracions, amb variació segons la cota, ni les de minva de rendiment per a descàrregues altes a causa de l'elevació del nivell d'aigua a la sortida de la turbina.

Les constriccions poden ésser expressades - com:

$$\underline{X} \leq X^{(i)} \leq \bar{X} \quad i = 1, \dots, Nl \quad (5)$$

i

$$\underline{U} \leq \hat{U}^{(i)} \leq \bar{U} \quad i = 1, \dots, Nl \quad (6)$$

Cal notar que el sistema d'inequacions (6) ha d'ésser satisfet per qualsevol de les -- possibilitats d'abortació natural. Les descàrregues mínimes representen cabals mínims que cal garantir, i les màximes són les que cal respectar per tal d'evitar danys.

La funció objectiu consistirà en una suma - ponderada de les components de $\hat{C}$ segons probabilitat d'abortació natural, és a dir:

$$\min_x \sum_k^{Np} g_k C_k \quad i = 1, \dots, Nl \quad (7)$$

essent g els pesos aplicats i c els costos corresponents a les distintes probabilitats d'abortació.

6. LIMITACIONS A LES VARIACIONS POSSIBLES - D'ABORTACIÓ A CONSIDERAR

Si es planteja l'òptim de /7/ subjecte a - les equacions i constriccions (1) a (6), es podria trobar que no existeix solució, ja - que el que es voldria obtenir fóra un conjunt de cotes $X^{(i)}$, $i=1, \dots, Nl$ que ens dones sin una estratègia òptima, i el que és més important, factible per a qualsevolga aportació natural que hi pugués haver.

Aquest tipus de solució pot sovint no existir, i llavors cal cercar una solució que - no inclogui, o bé els cabals excepcionalment alts, els quals tenen les probabilitats acumulades més baixes, o bé els cabals excepcionalment baixos, els quals tenen les probabilitats acumulades més altes, o bé cap - dels dos, de manera que limitem les aportacions considerades a les compreses entre -- les probabilitats acumulades p i $\bar{p}$ en tots o en alguns dels intervals. D'aquesta manera podem obtenir una solució encara que comportant un risc conegut, que les aportacions no siguin en realitat les que s'han pres en compte.

Cal aleshores revisar (1), (2), (3), (4), i (6) en el sentit que les aportacions, descàrregues, generacions, i costos, són només els originats per aportacions de probabili-

tats acumulades entre N_p/N_p , i N_p/N_p ; la funció objectiu queda aleshores com:

$$\min_x \sum_{k=N_p}^{\overline{N_p}} g_k c_k \quad i = 1, \dots, N_l \quad (8)$$

essent N_p i $\overline{N_p}$ el més petit i el més gran dels nombres N_p i $\overline{N_p}$ respectivament que són considerats en tots els intervals.

En els successius intervals d'un període d'optimització ja transcorregut, les aportacions naturals hauran anat adoptant valors corresponents a probabilitats diferents en general. Això no priva que siguin complertes les constriccions (6) si les cotes al llarg del període han sigut les obtingudes amb la solució òptima. Quant al cost de la producció tèrmica, suposant que hagin resultat veritables les prediccions de càrregues i les probabilitats de panes, haurem d'estar entre c_{N_p} i $c_{\overline{N_p}}$.

És interessant de tenir en compte que una variació de cota en un embassament por ésser possible amb aportacions naturals de probabilitat acumulada k/N_p , però no pas amb aportacions naturals d'algunes de les altres probabilitats considerades, per raó de violació de constriccions (6), en virtut del que s'esmenta en els punts 5) i 6) de l'Apèndix 3.2. Cas de succeir això, la variació de cota en qüestió és desestimada.

7. RESULTATS OBTINGUTS

S'ha desenvolupat un programa basat en la p.d. emprant descomposició espacial amb un grup restringit de dues variables, i considerant una faixa limitada de possible variació de les cotes al voltant de les anteriors o les inicials, per tal d'optimitzar una funció objectiu del tipus (8) subjecte a les equacions i constriccions (1) i (6). Així mateix s'han desenvolupat els programes de costos probabilístics i d'obtenció de cost probable segons generació hidràulica, per a fornir les dades per al programa d'optimització.

Els programes desenvolupats estan escrits en Fortran IV bàsic i han estat correguts en un minicomputador Hewlett-Packard 21MX, el qual té uns 0,9 microsegons de temps de

cicle (temps mig per multiplicació en coma flotant 50 microsegons), i paraula de 16 bits (un número sencer 16 bits, un número real 32 bits; no s'ha emprat doble precisió). La memòria disponible per a programes és de vint-i-sis mil i escaig paraules de 16 bits.

Tot seguit donem una mostra de l'actuació del programa.

7.1 Exemple d'aplicació i solució obtinguda

Es considera una xarxa elèctrica alimentada per 8 generadors tèrmics, les característiques dels quals estan a l'Apèndix 1, i per les centrals hidràuliques dels 6 embassaments de la Figura 3, les característiques dels quals estan donats a l'Apèndix 2. Un cop processades les dades dels generadors tèrmics i de les càrregues que mostra la Figura 1, obtingudes per un programa predictor de càrregues, s'arriba a les funcions de variació de cost segons la producció hidràulica que mostra la Figura 2. Considerant que les aportacions naturals són les que hi ha a la Figura 4, volem optimitzar el cost d'explotació durant les pròximes 53 setmanes tot passant de les cotes actuals $x^{(0)}$ a les cotes finals $x^{(53)}$ indicades a l'Apèndix 2. Es prendran en compte solament les aportacions compreses entre les probabilitats acumulades 0,25 i 0,75 en tots els intervals.

La solució obtinguda amb el programa que segueix els principis exposats, queda reflectida en les gràfiques de la Figura 5 que descriuen l'evolució òptima de les cotes durant les 53 setmanes. D'aquestes cotes es poden deduir, amb les dades dels embassaments, les descàrregues i produccions hidràuliques. Conegudes les produccions hidràuliques, amb un programa de costos probabilístics, podem deduir fàcilment les produccions tèrmiques de cada generador a cada interval.

7.2 Temps d'execució

Fa de mal dir quan triga el programa a assolir la solució perquè depèn de molts de factors com ara la proximitat de les condicions inicials a la solució, l'amplària de la faixa de proves al voltant de l'estratègia an-

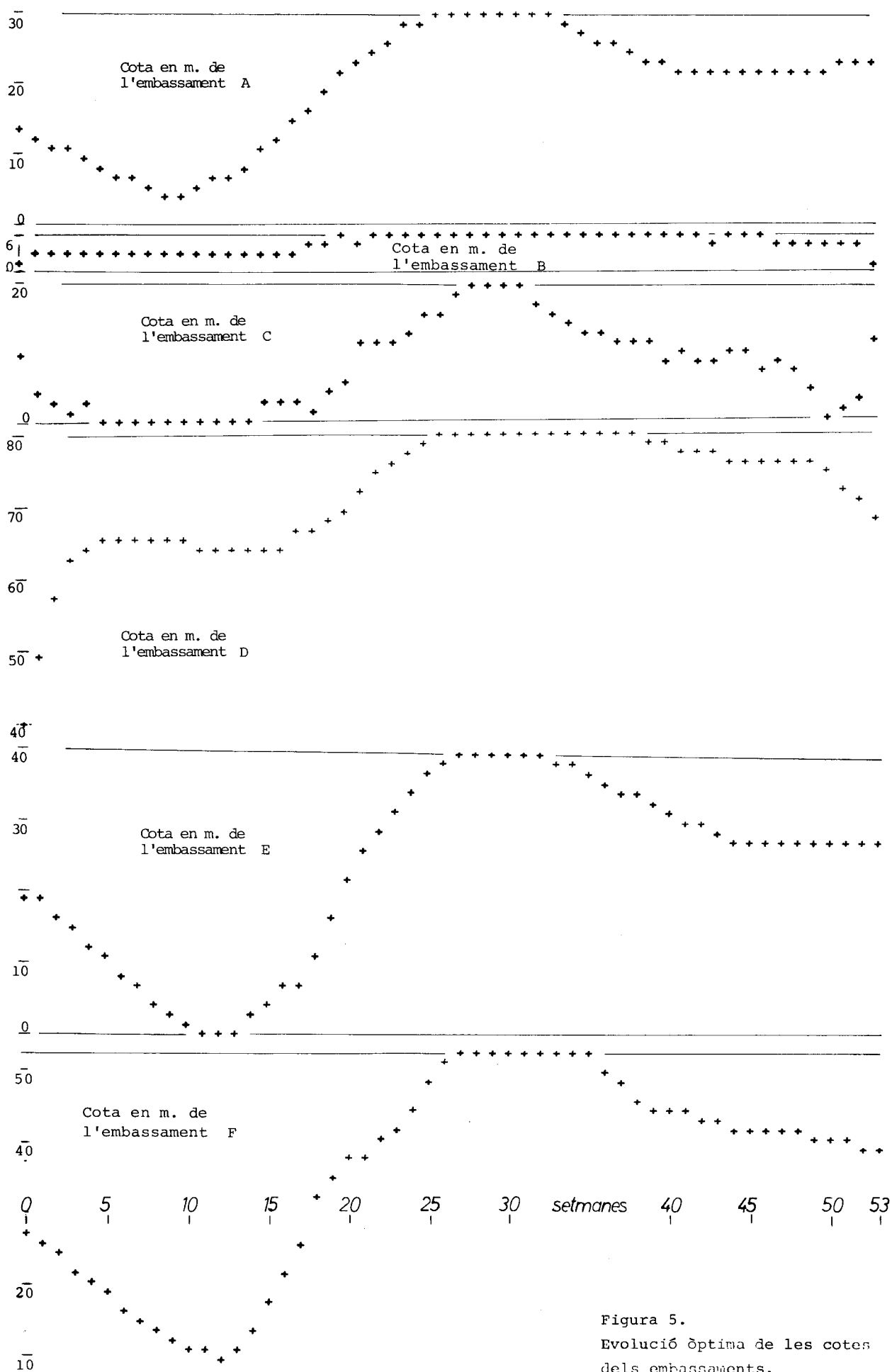


Figura 5.
Evolució òptima de les cotes
dels embassaments.

terior, la precisió relativa de les cotes, el nombre de valors discrets de probabilitats considerats, etc. Com a indicació pot fer-se servir el temps per a prova d'un grup restringit de dues variables i un nombre típic de proves per a assolir l'òptim des d'una estratègia inicial raonable.

Un altre fet a tenir en compte és que a mesura que els resultats es van aproximant a la solució, decreix la millora que els canvis de cota comporten en la funció objectiu, de manera que força abans de transcórrer totes les proves que porten a l'òptim, ja es disposa d'una solució prou bona, donat el caràcter probabilista de part de les variables.

La Taula 1 presenta una comparació entre el temps que triga la resolució de l'exemple descrit i un altre exercici amb la mateixa xarxa, embassaments, càrregues, i aportacions, resolt per al mateix període d'optimització, però subdividit en 12 intervals mensuals.

Ne	Na	Nl	Np	Nf	Md (p_{16})	Temps per prova (seg.)	N. típic de proves
6	3	12	20	5	4675	265	20
6	3	53	10	5	7470	665	25

Taula 1.
Dimensions, memòria i temps de càlcul per a dos exemples d'aplicació de Gestió Hidro-Tèrmica

El programa troba un òptim per a l'exemple exposat que representa una millora de l'11,66% respecte al cost de producció anyal d'una estratègia inicial raonable; triga aproximadament 13 hores de càlcul en el minicomputador emprat (71 proves de grups de dues variables). Cal però remarcar que el programa ja assoleix una solució, diferent només de la de cost mínim en menys d'un 1%, en unes 3 hores i 40 minuts (20 proves), resultat ja acceptable donat el caràcter probabilístic de les variables.

7.3 Requeriments de memòria

Distingim dues components de la memòria requerida, la que pren el programa M_0 , i la

que prenen les variables dimensionades i l'espai de treball M_d , essent el total necessari de memòria al minicomputador utilitzat la suma d'ambdues. El nombre total de sentències Fortran del programa és de 690.

M_0 referent al programa d'optimització val aproximadament al minicomputador emprat 8300 paraules de 16 bits. M_d és una funció del nombre de components de les distintes variables, tal com ho expressa la fórmula següent:

$$M_d = Ne(25+3Nl+2Np) + Nl(6+Nf^2+2Na(1+Np)) + Nf^2(1+4Np) + 8Np \quad (9)$$

A la Taula 1 es poden trobar els requeriments corresponents a l'exemple i a l'exercici de 12 intervals esmentats a 7.2

8. CONCLUSIONS

Hem mostrat com la gestió hidro-tèrmica a

llarg termini obeeix una metodologia rigorosa que, com a única simplificació, pren en consideració com a distribució probabilista les variables futures desconegudes referides a tot un interval de temps.

La consideració d'aportacions naturals de probabilitats diverses en un mateix estudi es demostra possible tenint en compte les hipòtesis d'uniformitat climàtica en els embassaments i prenent les cotes com a variables d'estat. La programació dinàmica amb descomposició espacial resulta una eina prou eficient per a resoldre problemes d'alta dimensionalitat tot i incorporar aportacions probabilistes.

Hem fet veure que l'optimització de la ges

tió hidro-tèrmica a llarg termini és a l'abast d'un minicomputador, ja que no s'ha de menester gaire memòria, i el temps de càlcul requerit no és prohibitiu tenint en compte la magnitud del problema i les relativament poques vegades que cal resoldre'l. La metodologia explicada és flexible i permet d'introduir variacions a les condicions d'explotació per a obtenir ràpidament modificacions en l'estratègia d'explotació.

9. RECONeixEMENTS

Els programes esmentats en aquest article han estat desenvolupats a EYSSA-Industrial de Barcelona, a la direcció de la qual l'autor agraeix el permís de publicació d'aquest treball. Les gràfiques de les Figures 1, 2, i 4, han estat traçades amb els mitjans gràfics del Centre de Càlcul de la Universitat Politècnica de Barcelona.

10. BIBLIOGRAFIA

/1/ R.N. BRUDENELL i J.H. GILBREATH.: "Economic complementary operation of hydro storage and Steam power in the integrated TVA system", AIEE Transactions on P.A.S., 1959, v. 78, pp. 136-156.

/2/ R.E. LARSON.: "A survey of dynamic programming computational procedures", IEEE Transactions on A.C., 1967, v. 12, pp. 767-774.

/3/ F.J. REES i R.E. LARSON.: "Computer-Aided dispatching and operations planning for an electric utility with multiple types of generation", IEEE Transactions on P.A.S., 1971, v. 90, pp. 891-899.

/4/ L. ENGLER, R.E. LARSON, J. PESCHON, i K.N. STANTON.: "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 engineering".

/5/ F.A. VIRAMONTES i H.B. HAMILTON.: "Optimal long range hydro scheduling in the integrated power system", article F 77 112-6 presentat al IEEE 1977 PES Winter

Meeting, Nova York, Gener-Febrer del 1977.

/6/ H. BALERIAUX, E. JAMOULLE, i F. LINARD "Simulation de l'exploitation d'un parc de machines thermiques de production d'électricité couplé à des stations de pompage", Revue E de la S.R. Belge des Electriciens, 1967, v. 5, pp. 225-245.

/7/ N. NABONA.: Discussió a /5/, a ser publicada proximitat junt amb /5/ a les IEEE Transactions on P.A.S.

/8/ R.E. LARSON i W.G. KECKLER.: "Applications of dynamic programming to the control of water resource systems", Automatica, 1969, v. 5., pp. 15-26.

/9/ J.L. SOLANAS i M. VERGÉS.: "Extension of the dynamic programming successive approximations procedure and its application to automatic operational control of water distribution systems", IFAC/IFORS Symposium, Octubre del 1974.

/10/ J.L. SOLANAS.: "Un procedimiento de determinación de la explotación óptima. Aplicación al mando automático de sistemas de suministro de agua", Agua, 1975, pp. 32-40.

/11/ A.J. KORSACK i R.E. LARSON.: "A dynamic programming successive approximation technique with convergence proofs", Automatica, 1970, v. 6, pp. 253-260.

APPENDIX 1. CARACTERÍSTIQUES DELS GENERADORS TÈRMICS

La llista següent dona la capacitat, fiabilitat, cost linial i cost quadràtic dels generadors classificats segons ordre d'incorporació.

GENERADORS TÈRMICS				
ORD.	CAP. MW	FIA. P.U.	C.L. COST/KWH	C.Q. COST/KWH**2
1	300.0	.97	1.5000	.00100
2	200.0	.96	1.7140	.00280
3	200.0	.89	1.9280	.00550
4	160.0	.92	2.1420	.00820
5	150.0	.91	2.3560	.01090
6	100.0	.86	2.5700	.01360
7	70.0	.88	2.7840	.01630
8	50.0	.93	3.0000	.02000

APÈNDIX 2. CARACTERÍSTIQUES I CONSTRICCIONS
DELS EMBASSAMENTS I CENTRALS HIDRÀULIQUES

De cada embassament es dona el volum, la generació màxima possible i el rendiment en - MW-setmanes/m³ com a funció de la cota.

EMBASSAMENT A			
COTA (M)	HM**3	H MW	R MWS/HM**3
.	17.94	10.18	.7220
6.	33.80	13.96	.8269
12.	56.99	17.75	.9319
18.	88.93	21.54	1.0368
24.	131.00	25.32	1.1418
30.	184.61	29.11	1.2467

EMBASSAMENT B			
COTA (M)	HM**3	H MW	R MWS/HM**3
.	4.70	.00	.6741
2.	12.89	2.50	.6920
4.	27.39	5.00	.7098
6.	50.00	7.50	.7277

EMBASSAMENT C			
COTA (M)	HM**3	H MW	R MWS/HM**3
.	18.50	26.59	1.1286
4.	30.03	32.12	1.1767
8.	45.57	37.65	1.2248
12.	65.71	43.17	1.2728
16.	91.06	48.70	1.3209
20.	122.20	54.23	1.3690

EMBASSAMENT D			
COTA (M)	HM**3	H MW	R MWS/HM**3
.	4.00	80.00	1.0000
10.	13.50	95.00	1.2000
20.	32.00	110.00	1.4000
30.	62.50	125.00	1.6000
40.	108.00	140.00	1.8000
50.	171.50	155.00	2.0000
60.	256.00	170.00	2.2000
70.	364.50	185.00	2.4000
80.	500.00	200.00	2.6000

EMBASSAMENT E			
COTA (M)	HM**3	H MW	R MWS/HM**3
.	17.32	20.00	1.0119
5.	27.50	21.87	1.1012
10.	41.05	23.75	1.1905
15.	58.45	25.62	1.2798
20.	80.17	27.50	1.3690
25.	106.71	29.37	1.4583
30.	138.54	31.25	1.5476
35.	176.14	33.12	1.6369
40.	220.00	35.00	1.7262

EMBASSAMENT F			
COTA (M)	HM**3	H MW	R MWS/HM**3
.	6.66	30.00	.8854
9.	16.74	34.95	1.0193
18.	33.86	39.90	1.1533
27.	59.89	44.85	1.2872
36.	96.68	49.80	1.4211
45.	146.09	54.75	1.5551
54.	210.00	59.70	1.6890

Finalment es donen les constriccions en cota i descàrrega, aquestes en Hm³ per setmana.

CONSTRICCIONS, COTES INICIALS, I FINALS					
X (M)	X̄ (M)	U HM**3/SHA	Ū HM**3/SHA	X(0 (M)	X(53 (M)
A 0	30	.00	97.81	14	24
B 0	6	.00	97.81	2	2
C 0	20	3.45	103.56	10	12
D 0	80	6.90	299.18	40	68
E 0	40	.00	92.05	20	28
F 0	54	4.60	161.10	28	40