

PLANIFICACIÓ DE LA CAPACITAT I PROGRAMACIÓ DE LA PRODUCCIÓ D'UNA EMPRESA CERVESERA MITJANÇANT LA PROGRAMACIÓ LINEAL

A. COROMINAS, J. BAUTISTA, J. ÒLIVA
UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

Hom descriu un model de programació lineal per a l'optimització de la producció i el transport d'una empresa cervecera multiplanta amb demanda fortament estacional.

S'inclou també una breu exposició sobre els criteris adoptats per a l'elaboració del model i les seves aplicacions més significatives.

Keywords: LINEAR PROGRAMMING APPLICATIONS; PRODUCTION AND DISTRIBUTION PLANNING; BREWERY SYSTEMS.

1. INTRODUCCIÓ.

Es descriu una aplicació de la programació lineal a una empresa cervecera de gran volum de producció que disposa de tres plantes en una determinada àrea comercial.

Per atendre la demanda creixent, l'empresa havia de fer una ampliació de les seves instal·lacions i, per ajudar a elegir la millor alternativa per a dur-la a terme, es va plan-tejar l'elaboració d'un model matemàtic.

La necessitat de tal model es justificava, fonamentalment, per dues raons. D'una banda, la complexitat del sistema productiu de l'empresa a l'àrea al·ludida; una empresa cervecera obté most, el transforma, a través d'un procés de maduració, en cervesa (que pot ésser transportada, en cisternes, d'una fàbrica a l'altra), l'envasa (en ampolles, barrils o llaunes) i la duu als magatzems des d'on és distribuïda; per tant, la gestió d'un sistema multiplanta de fabricació de cervesa ha de -- considerar-lo com a un tot i no com a la mera juxtaposició de centres productius, perquè -- aquests estan vinculats a través del trans-- port i, per tant, no són independents, cosa que és positiva, perquè dóna més flexibilitat, però fa més difícil copsar totes les dades i relacions així com les repercussions d'una determinada decisió en el conjunt del sistema.

D'una altra banda, almenys en un clima com el de l'àrea a què s'ha fet abans referència, la demanda de cervesa presenta fortes variacions estacionals, tant pel que fa al seu volum total com quant a la proporció, en el conjunt de la demanda, de cada producte (considerant com a producte el parell -- constituït per un tipus de líquid i un tipus d'envàs); els costos d'emmagatzemar cervesa envasada són molt alts en relació al valor del producte (bàsicament, pel seu valor baix per unitat de volum i per la necessitat de grans superfícies de magatzem ubicades, en general, en zones amb un preu -- del sòl molt alt) i, a més, la qualitat del líquid es ressent del temps transcorregut entre l'envasat i el consum. Així doncs, te-- nint en compte que la demanda de cervesa, -- majoritàriament, no és diferible, el programa de producció ha de seguir un ritme molt similar al de la demanda i, per tant, ha -- d'ésser molt diferent d'un període a l'al-- tre i no és fàcil d'establir intuïtivament o basant-se només en l'experiència.

En definitiva, la comparació d'alternatives en el disseny del sistema productiu no és -- una qüestió trivial i, de fet, requereix un procediment per determinar quina és la gestió òptima d'un sistema productiu donat.

- A. Corominas, J. Bautista i J. Oliva - Universitat Politècnica de Catalunya - Escola Tècnica d'Enginyers Industrials de Barcelona - Dept. de Tècniques Quantitatives de Gestió. Av. Diagonal, 647 - Barcelona 08028.

- Article rebut el febrer de 1986.

Aquesta optimització és la que es tractava d'obtenir a través de l'esmentat model; el qual, per tant, si s'elaborava de manera - que representés la realitat amb prou detall, podia tenir aplicació, també, a la programació de la producció per a un període determinat.

2. CRITERIS PER A L'ELABORACIÓ DEL MODEL.

Abans de formular un model cal plantejar-se, òbviament, per a què i per a qui és. També, per descomptat, quin és el vertader problema i si no n'hi ha d'altres que es puguin re soldre, a més, amb el mateix esforç o amb molt poc esforç addicional. En aquest sentit s'havia de tenir present que l'empresa no tenia experiència en l'ús de models matemàtics per a la gestió de la producció i també, d'una altra banda, com és lògic, les limitacions en els recursos destinats a la pos ta a punt del model.

En una aplicació de tipus industrial, no ex clusivament acadèmica, perden rellevància as pectes tals com la innovació i l'elegància - formal. N'adquireix, en canvi, la credibilitat del model entre els seus destinataris, - de la mateixa manera que succeeix, com és - ben sabut, en les aplicacions de la informàtica a la gestió.

Una de les primeres decisions que calia adoptar era la relativa al grau de detall del - model. Per a la planificació de la capacitat productiva n'hi havia prou amb poc detall; - però aleshores el model no hagués servit per a la gestió quotidiana i els seus resultats haguessin estat més difícils d'interpretar o reconèixer per als tècnics de l'empresa, la qual cosa repercutiria en el menyscapte de la credibilitat del model. S'optà, en definitiva, per un detall suficient perquè el model no exhaurís la seva utilitat en una - primera aplicació sinó que pogués ésser emprat amb profit en la programació de la producció, però tractant com a dades, i no com a variables del model, les decisions corresponents als productes menys significatius en el conjunt de la facturació i/o tals que les decisions a ells relatives no tenen alternativa possible o es poden prendre a priori -- sense risc d'equivocar-se o amb poca reper-- cussió sobre els resultats.

En el sistema productiu d'una empresa cerve- sera hi ha nombroses relacions no lineals o discontinuïtats, la modelització de les -- quals exigiria la utilització de variables binàries i donaria lloc a models de programació lineal mixta. Per exemple, el canvi de tipus d'ampolla en un tren d'envasat exigeix un atur en les màquines durant un temps que no és menyspreable (ultra altres inconvenients que fan el canvi poc desitjable); altres exemples: la possibilitat o no de fer - segons i tercers tornos o el fet que, per a atendre un tren d'envasat, cal un equip -- format, almenys, per un nombre determinat de persones; el temps que cal per a netejar els trens d'envasat tampoc no és proporcional a llur utilització.

Efectivament, en dos treballs que descriuen precisament, sengles aplicacions de la progra mació matemàtica a la indústria cervesera -- (referències /1/ i /2/) els models eren programes lineals mixtes de dimensions considerables (14000 restriccions i 85000 varia-- bles, de les quals 2600 binàries, pel que fa al model descrit a /2/, per a un sistema pro ductiu de 17 factories).

Les condicions descrites més amunt no permetien d'abordar un model d'aquesta envergadura, però, per descomptat, hom no podia ignorar les esmentades discontinuïtats.

Aquestes consideracions convergiren amb algunes altres en la decisió de plantejar un model de programació lineal continua de dimensions mitjanes, que pogués ésser tractat en un ordinador personal, amb la flexibilitat suficient perquè, amb una explotació interactiva, poguessin ésser tingudes en compte les característiques del sistema productiu no incorporades al model i, evidentment, perquè pogués ésser adaptat a hipòtesis diverses sobre la infraestructura productiva i/o sobre la demanda, tant pel que fa al seu volum global com a la seva composició per -- productes.

En resum, un model relativament senzill, d'a plicació fàcil i còmoda i amb certes possibilitats d'interacció.

3. DESCRIPCIÓ GENERAL DEL MODEL.

El planteig del model es basà en una representació del sistema productiu tal com la de la figura 1.

Materialment, el model inclou una descripció, a través de taules numèriques, de la infraestructura i de les opcions de gestió que són considerades com a dades.

Per a descriure la demanda es dóna el volum corresponent a cada un dels productes. És fàcil la substitució d'una llista de valors -- per una altra de manera que ho és també la introducció d'hipòtesis diverses de demanda.

El model, donades una infraestructura, una demanda i unes opcions, optimitza la gestió d'un període de N dies laborables, determinant:

- On s'ha de produir cada tipus de most i en quines quantitats.
- Les quantitats de cervesa que s'ha de transportar, en cisternes, d'una planta a l'altra.
- Les quantitats de cada producte que hom ha d'obtenir de cada tren d'envasat.
- Les quantitats de productes (envasats) a transportar, en semiremolcs, d'una planta a l'altra.

Les restriccions expressen els balanços de matèria en els diversos punts del flux del procés i les limitacions de les instal·lacions i de la mà d'obra.

El model és executable en un ordinador personal de 256 K. amb un software comercial - que consta, fonamentalment, d'un mòdul generador de matrius i un altre d'optimització del programa lineal. El temps d'introducció d'hipòtesis i d'execució és d'alguns minuts.

L'explotació del model resulta, per tant, - molt econòmica i això permet, a la pràctica, tenir en compte algunes de les restriccions que no hi són incorporades. Per exemple, una solució en què un tren polivalent, que té la possibilitat de treballar amb diversos tipus d'envàs, estigui saturat i hagi d'omplir, possem per cas, envasos A i envasos B, i en què

el nombre d'envasos B, per exemple, sigui petit, pot ésser comparada fàcilment, a través d'una nova explotació del model, amb una altra en què el tren tingui prohibit omplir envasos de tipus B. Un altre exemple és el de la mà d'obra d'envasat, els costos de la --- qual no són proporcionals a la producció; -- així es pot tenir en compte mitjançant dues o tres explotacions del model: una primera - sense plantilla fixa i considerant tots els costos de mà d'obra proporcionals a l'activitat i explotacions successives suposant una plantilla que es dedueix, manualment, dels - resultats de l'explotació anterior.

4. DESCRIPCIÓ DEL MODEL.

A continuació es fa una descripció més detallada del programa lineal, que es refereix a les dades necessàries, la funció objectiu i les restriccions a què estan sotmeses les variables.

Les dades requerides són dels tipus següents:

- Dades sobre les capacitats de producció de most a cada planta i segons el nombre de - tornos de treball.
- Paràmetres corresponents al transport (capacitat de les cisternes, capacitat dels semiremolcs, nombre de viatges al dia, nombre de dies en què es fa transport...).
- Paràmetres corresponents al procés d'envasat (nombre de trens a cada planta, capacitat nominal i rendiment dels trens, tipus d'envàs que pot omplir cada tren...).
- Dades referents a la mà d'obra d'empleats per planta d'envasat; nombre d'empleats necessaris per a fer funcionar cada tren; possibilitat de tornos; cost de la mà d'obra, per tornos...).
- Demanda prevista per al període, per productes (quantitat, en hectòlitres).

L'objectiu és la minimització de costos, que es componen dels tres següents:

- Costos de la mà d'obra d'envasat, que depenen del torn, del nombre de treballadors i de nombre d'hores treballades.
- Costos de transport, que inclouen els de

transport en cisternes de la cervesa i els del transport en semiremolcs dels productes acabats.

- Costos de la maquinària.

Finalment, les restriccions expressen que:

- La producció de most en cada planta no podrà excedir la capacitat (que depèn del nombre de torns).
- La quantitat de cervesa produïda en cada planta (que no coincideix amb la de most, ja que hi ha pèrdues de volum en el procés de transformació de most a cervesa) ha d'ésser igual a la que resta a la planta més la que és transportada, en cisternes, cap a les altres plantes.
- La cervesa disponible a cada planta (la fabricada a la mateixa planta i que hi resta més la que hi arriba, en cisternes, procedent de les altres plantes), ha d'ésser igual a la suma dels inputs als trens d'envasat ubicats a la planta.
- Les quantitats de cada producte envasades a cada planta (la suma de les quals no coincideix amb la dels inputs dels trens, ja que en el procés d'envasat hi ha pèrdues) han d'ésser iguals a les que romanen a la planta més les que són transportades, en semi-remolcs, cap a les altres.
- La quantitat de cada producte disponible a cada planta ha d'ésser igual a la demanda que s'hi dirigeix.
- El nombre d'hores de funcionament de cada tren d'envasat no podrà ésser superior a les hores disponibles (depèn dels torns i s'han de deduir les hores de neteja i d'altres temps morts).
- El nombre de treballadors requerits (per planta o bé globalment), no pot ésser superior al nombre de treballadors disponibles.

El model s'ha escrit en el llenguatge del mòdul PL-MODEL (XPRES Professional Software -- 1984).

LP-MODEL genera les dades que descriuen la matriu del problema, els quals adopten un

format estàndard. Les explotacions poden realitzar-se mitjançant els mòduls LP-OPT87 ó LP-OPT88, i els resultats així obtinguts poden ésser consultats amb el mòdul LP-RPRT. Aquests tres últims mòduls també corresponen a XPRES Professional Software. Tots són executables en un ordinador personal IBM i compatibles amb una configuració mínima de 256 Kb.; si s'empra el LP-OPT87 cal també el co-processador aritmètic INTEL 8087.

El temps per a la variació de paràmetres en el model és, habitualment, de l'ordre de 5 minuts.

Per una altra banda, el temps d'execució des de la generació de les dades fins a l'obtenció de resultats és de l'ordre de 15 minuts.

La capacitat del software emprat és de 500 variables i 300 restriccions, mentre que les dimensions del model són de l'ordre de 37 variables i 275 restriccions.

A continuació s'inclou la relació de coeficients, paràmetres i variables del model i un exemple de conjunt de restriccions (s'ometen detalls molt poc rellevants o que allargarien massa aquesta exposició).

Els índexos i, j, m, t, l, f corresponen respectivament als següents conceptes:

i -->	planta de sortida del producte.
j -->	planta d'arribada del producte.
m -->	número de tren
t -->	número del torn de treball.
l -->	tipus de líquid.
f -->	tipus de envàs

VARIABLES

$P(i, j)$	= Producció de líquid l a la planta i ($H1$).
$G(i, j, l)$	= Líquid l transportat (en cisternes) des de la planta i fins a la j ($H1$).
$ET(m, j, l, f)$	= Líquid l en format f que envasa el tren m de la planta j ($H1$).
$H(m, j, t, f)$	= Hores de funcionament del tren m de la planta j en el torn t , per a envasos de format f .
$E(i, j, l, f)$	= Líquid l en format f transportat

des de la planta i fins a la
j (H1).

COEFICIENTS I PARÀMETRES

- c(j) = Capacitat de producció de most a la planta j (H1).
- k1 = Rendiment de producció de cervesa a partir del most.
- k2 = Rendiment en la realització de l'envasat.
- a(i,j) = H1 de cervesa que pot transportar una cisterna des de la planta i fins a la j en el període de temps considerat.
- nc = Nombre de cisternes disponibles.
- b(i,j,f) = H1 de cervesa envasats en format f que pot transportar un semi-remolc des de la planta i fins a la j en el període de temps considerat.
- ns = Nombre de semi-remolcs disponibles.
- c(m,j,f) = H1/h que envasa el tren m de la planta j en format f.
- nh(j,t) = Nombre de persones disponibles a la planta j per al torn t.
- d(l,f,j) = Demanda a la planta j de líquid l en format f.
- hd(j,t) = Hores disponibles a la planta j per al torn t.
- ne(m,j) = Nombre d'empleats necessaris per a fer funcionar el tren m de la planta j.
- ce(t) = Cost per hora d'un empleat per al torn t.
- cg(i,j) = Cost per a transportar, amb cisternes, l H1 de líquid des de la planta i fins a la j.
- cb(i,j,f) = Cost per a transportar l H1 de líquid envasat en format f des de la planta i fins a la j.

FUNCIO ECONÒMICA.

$$\begin{aligned}
 [\text{MIN}] Z = & \sum_{m,j} ne(m,j) \sum_t ce(t) \sum_f H(m,j,t,f) + \\
 & + \sum_{i,j,l} cg(i,j) * G(i,j,l) + \\
 & + \sum_{i,j,l,f} cb(i,j,f) * E(i,j,l,f)
 \end{aligned}$$

RESTRICCIONS.

Capacitat de producció:

$$\sum_l P(1,j) \leq c(j) \quad \forall j$$

Transport en cisternes:

$$\sum_j G(i,j,l) = k1 * P(1,i) \quad \forall i, \forall l$$

Limitacions en transport:

$$\sum_{i,j,l} G(i,j,l) / a(i,j) \leq nc$$

$$\sum_{i,j,l,f} E(i,j,l,f) / b(i,j,f) \leq ns$$

Transport en cisternes = Envasat pels trens

$$\sum_i G(i,j,l) = \sum_{m,f} ET(m,j,l,f) \quad \forall j, \forall l$$

Relació de les hores d'envasat amb la quantitat de producte

$$\begin{aligned}
 c(m,j,f) \sum_t H(m,j,t,f) &= ET(m,j,l,f) \\
 \forall m, \forall j, \forall l, \forall f
 \end{aligned}$$

Limitació hores d'envasat

$$\sum_f H(m,j,t,f) \leq hd(j,t) \quad \forall m, \forall j, \forall t$$

Restriccions de plantilla

$$\begin{aligned}
 ne(m,j) * \sum_f H(m,j,t,f) &\leq hd(j,t) * nh(j,t) \\
 \forall m, \forall j, \forall t
 \end{aligned}$$

Quantitat de líquid envasat = Sortida de líquid envasat

$$\sum_m k2 * ET(m,i,l,f) = \sum_j E(i,j,l,f) \quad \forall i, \forall l, \forall f$$

Entrada de líquid envasat = Demanda

$$\sum_l E(i,j,l,f) = d(l,f,j) \quad \forall j, \forall l, \forall f$$

5. APLICACIONS.

Les diverses aplicacions del model poden classificar-se en tres grups, és a saber:

- planificació de la capacitat productiva

- impacte d'opcions estratègiques o tàctiques
- programació de la producció.

A continuació es relaciona una selecció de les aplicacions incloses en cada un dels grups esmentats.

5.1. PLANIFICACIÓ DE LA CAPACITAT PRODUCTIVA.

- Determinació de la capacitat i la ubicació dels trens d'envasat que són necessaris per a dur a terme una determinada producció.
- Comparació d'alternatives en les instal·lacions de producció de líquid (distribució espacial de la capacitat).
- Comparació d'alternatives en el parc de trens d'envasat.

5.2. IMPACTE D'OPCIÓNS ESTRATÈGIQUES O TÀCTIQUES.

- Modalitats de funcionament dels trens d'envasat.
- Torns d'envasat.
- Dimensions de les plantilles.
- Torns en la producció de líquid.
- Distribució de la demanda entre els diversos magatzems de producte acabat.
- Mobilitat geogràfica de les plantilles.

5.3. PROGRAMACIÓ DE LA PRODUCCIÓ.

- Determinació, per a un cert horitzó temporal, dels programes de:
 - producció de most
 - transport de cervesa amb cisternes
 - envasat
 - transport producte envasat.

6. COMENTARIS FINALS.

La posta a punt del model es va fer amb un contacte freqüent entre els directius tècnics de la cervesera i l'equip universitari d'investigació operativa.

Aquest contacte va facilitar l'obtenció de les dades indispensables, les quals, per cert, no sempre estan disponibles. Un dels impactes positius de la implantació d'un model és justament el fet que obliga a elaborar o posar al dia informacions que són útils per a la gestió, fins i tot encara que no es disposi de cap model.

El contacte, a més, va fer possible que els resultats s'anessin comparant amb la realitat ben coneguda pels tècnics, cosa que va permetre de rectificar errors en les dades o en el planteig, fins a aconseguir una sintonia adequada entre el model i el sistema productiu que representa. I, finalment, va permetre que els destinataris i futurs usuaris del model s'hi anessin familiaritzant i anessin coneixent les seves possibilitats alhora que adquirien confiança en els resultats que forneix.

La possibilitat de posar a punt i explotar en un ordinador personal un model de dimensions mitjanes ha estat la clau de l'accessibilitat del model, la qual és decisiva per a la flexibilitat d'aquesta eina de gestió, així com per a l'acollida que assoleixi per part dels seus usuaris.

Per a una empresa cervesera els costos incorporats a la funció objectiu d'aquest model poden representar un 10% de la seva facturació i una proporció molt superior dels seus beneficis, ja que es tracta d'un producte amb poc marge; les diferències entre diverses solucions "raonables", per a una mateixa infraestructura, poden ésser del 5% o del 10% dels costos considerats (per tant, d'un 0,5 a un 1% de la facturació). Els costos del model (estudis i hardware i software necessaris per a explotar-lo) representarien una proporció variable, en funció de la dimensió de l'empresa, dels estalvis que potencialment hom podria obtenir amb la seva aplicació (en el cas que es descriu aquesta proporció fóra, aproximadament, de 1,1%).

7. RECONeixEMENTS.

Al professor J. Blasco, que ens proposà el problema; a la S.A. DAMM, per compte de la qual va ésser realitzat l'estudi, que ha --

autoritzat amablement la publicació d'aquest treball; finalment, als directius tècnics de l'empresa, sense la col.laboració dels quals no s'hagués pogut dur a terme.

8. REFERÈNCIES.

- /1/ DURAN, F.; DE CARRASCO, M.E.; GONZALEZ, H.; RIBERO, F.; TOVAR, L.J.: "A Production Capacity Expansion Planning Model for the Largest Brewery System in Colombia". Comunicació presentada al XXVI International Meeting del T.I.M.S., Copenhagen, 1984.

- /2/ DURAN, F.; DE CARRASCO, M.E.; GONZALEZ, H.; RIBERO, F.; TOVAR, L.J.: "A user-Oriented Algorithm for Solving a Large-Scale Mixed Integer Programming Model for the Monthly Production and Distribution Problem of the Largest Brewery in Colombia". Comunicació presentada al -- XXVI International Meeting del T.I.M.S., Copenhagen, 1984.

