

# UN MODELO DE INVESTIGACION OPERATIVA PARA LA PLANIFICACION DE ALMACENES, A SEMEJANZA DE LOS MODELOS DE REGULACION FLUVIAL (\*)

Por J. M. ANTON CORRALES

Ing. de Caminos, Canales y Puertos.  
Prof. Enc. de Curso de Estadística.

*Presenta este artículo informativo dos modelos matemáticos de investigación de operaciones para la gestión de una red comercial, el primero ambicioso y requiriendo muchos medios para ser llevado a la práctica, el segundo mucho más modesto, teniendo en cuenta únicamente una regulación parecida a la de los ríos en un embalse. El primer modelo no es más que una aplicación hipotética de programación lineal. En ella se optimizaría la ganancia en el año siguiente, a partir de la situación en un momento dado. Serían variables las producciones y los movimientos de productos mensuales, restricciones los límites técnicos de producción y de almacenamiento. Estos últimos pueden considerarse variables con un coste de instalación. Se introduce también el coste de los almacenes inmovilizados, como interés del capital activo que representan. Sin embargo, la ejecución de este modelo hubiese sido muy laboriosa. El segundo no requiere más que elaborar las facturas en ficha perforada del año anterior. Dan, convenientemente agrupados por productos intercambiables en una cadena de fabricación, una suma de caudales mensuales y de caudales acumulados que se conservará año tras año con algunas variaciones, según el modo de emplear los abonos en el campo. Según el modo de fabricación necesitaremos en cada almacén de fábrica un volumen máximo dado por la mayor existencia en el año. La mejor marcha es la uniforme de las fábricas. Con esta marcha se determinan muy fácilmente los volúmenes necesarios de almacenes de fábrica para una fabricación continua y una salida a voluntad del cliente, sin más que considerar la curva irregular de salidas acumuladas a lo largo del año y la de entradas uniforme, del mismo modo como se halla el volumen de embalse para regular un río con aportación irregular y salida uniforme. Considerando caudales acumulados puede este método ponerse en práctica fácilmente.*

## I. INTRODUCCION

Presté servicios durante parte de los años 1968 y 1969 en la Unión Española de Explosivos en Madrid, pasando después al Instituto Torroja. Aparte de otros trabajos, uno de ellos de transportes, me ocupé de Investigación Operativa.

La Unión Española de Explosivos (hoy en fusión con Riotinto) es una de las principales Compañías españolas productoras y distribuidoras de abonos, aparte de otras actividades de las cuales la producción, distribución y venta (con asistencia técnica gratuita) de explosivos industriales es la más relacionada con las Obras Públicas.

Estudí la posibilidad de hacer un modelo matemático para la producción y venta de abonos inorgánicos.

La biblioteca del Instituto de Investigación Operativa y Estadística del C. S. I. C. tiene numerosas publicaciones de Investigación Operativa; en particular los *Abstracts in Operations Research*, de la Operations Research Society of America. Sin embargo—estudios generales de una redgo, no encontramos—tal vez los haya, si de producción y venta. En cambio existen bastantes estudios locales de emplazamiento de almacenes que, en general, optimizan costos de transporte.

---

(\*) Se admiten comentarios sobre el presente artículo, que pueden remitirse a la Redacción de esta Revista, hasta el 30 de junio de 1970.

## II. POSIBLE SOLUCION TEORICA

La investigación Operativa unida a la Informática nos permite hacer unos modelos matemáticos muy elegantes y muy satisfactorios para el espíritu. Enunciamos un modelo teórico y veamos después sus inconvenientes.

### A) Un modelo basado en la programación lineal.

La empresa consta de las fábricas  $i$ , que producen los productos  $j$ , vendidos en la propia fábrica  $i$ , o en almacenes  $l$ , a clientes situados en los puntos  $m$ .

En el mes  $n$ , la fábrica  $i$  produce  $x_{ijn}$  del producto  $j$ , con un coste de  $c_{ij}$ . El coste será "variable"; o sea, incremento de coste/incremento de producto; puede aproximarse mediante lo que los contables llaman coste directo. Incluirá costes de materias primas aunque sean los propios productos fabricados.

Las ventas del producto  $j$  en el mes  $n$  en el punto  $m$  pueden ser, a partir de almacén, en cantidad  $y_{jlmn}$ , o a partir de fábrica, en cantidad  $Y_{ijnm}$ . El precio del producto  $j$  se supone  $p_{jm}$  dado en el punto de venta (es un precio constante más portes dependientes del punto de venta). Se supondrá fijo el precio (en algún caso convendría considerar su variación).

En cada fábrica a corto plazo (un año) habrá que considerar un límite técnico de producción representado por desigualdades:

$$\sum_j x_{ijn} \cdot d_{ijk} \leq e_{ik}$$

Cada desigualdad tiene su índice  $k$ , apareciendo, pues, unos coeficientes constantes,  $d_{ijk}$ , y otros constantes a corto plazo,  $e_{ik}$ , que podrían considerarse variables sin inconveniente matemático.

En cada punto de venta habría un límite comercial de ventas. En un mercado de fuerte competencia no es grave no poder aceptar un pedido, por lo que no impondremos ni una cifra de ventas ni un coste de ruptura de ventas. Por ello, los límites serán de:

$$\sum_{il} (y_{jlmn} + Y_{ijnm}) \leq H_{jnm}$$

límite de ventas del producto  $j$  en la zona  $m$  el mes  $n$ . Alguna otra restricción de límites de salidas en ciertos puntos, por capacidad de transporte, sería de interés.

Las unidades pueden ser toneladas, mes y pesetas para todo, con sus derivadas (toneladas por mes, pts./T).

El contenido de un almacén de fábrica al final de un mes es de  $F_{ijn}$  (en el mes  $n$ , del producto  $j$ , en la fábrica  $i$ ). Su variación es la suma algebraica de la producción  $x_{ijn}$ , ventas  $Y_{ijnm}$ , salidas a almacén  $f_{iljn}$  (al almacén  $l$ ), transportes de la fábrica  $i'$  a la  $i$ ,  $Z_{i'i'jn}$ , consumo interno  $X_{ijn}$ . Todo ello en la fábrica  $i$ , mes  $n$ , para el producto  $j$ , conduce a la relación

$$x_{ijn} - \sum_m Y_{ijnm} - X_{ijn} - \sum_l f_{iljn} + \sum_{i'} Z_{i'i'jn} = F_{ijn} - F_{ij(n-1)}$$

para cada mes  $n$ , fábrica  $i$ , producto  $j$ .

En cada almacén  $l$ , para cada producto  $j$ , al final del mes  $n$  resulta un depósito  $E_{ljn}$ , que varía con las entradas mensuales  $f_{iljn}$  (de la fábrica  $i$ ), y las ventas  $y_{jlnm}$ , cumpliendo

$$E_{ljn} - E_{lj(n-1)} = \sum_i f_{iljn} - \sum_m y_{jlnm}$$

Los almacenes de fábrica ( $i$ ) y de almacén ( $l$ ) tienen una capacidad  $H_i$  y  $G_l$ , respectivamente. Debe cumplirse cada mes  $n$

$$\sum_j F_{ij n} \leq H_i \quad \text{y} \quad \sum_j E_{lj n} \leq G_l,$$

respectivamente, para todos los  $i, l$ . Puede interesar considerar las capacidades  $H_i$  y  $G_l$  constantes a corto plazo. También serviría el considerarlas variables, a ciertos fines, incluyendo una amortización del capital empleado en almacenes.

Nos queda por exponer una relación interna entre consumos propios y producción

$$X_{ijn} = \sum_k A_{ijk} \cdot x_{ikn}$$

que expresa que para producir en la fábrica  $i$  la cantidad  $x_{ikn}$  del producto  $k$  hace falta una cantidad unitaria  $A_{ijk}$  del producto  $j$ . La relación se cumplirá todos los meses.

Con un coste del capital  $\alpha$  (del 8 por 100 al 10 por 100), y unos costes totales de transporte de  $q_{il}$  de la fábrica  $i$  al almacén  $l$ ,  $s_{lm}$  del almacén  $l$  al punto de consumo  $m$ , de  $r_{im}$  de la fábrica  $i$  al punto de consumo  $m$  y de  $t_{i'}$  de la fábrica  $i'$  a la  $l$ , se pueden optimizar ingresos menos gastos de la forma (en ella se podría valorar el producto a su coste y no a su precio de venta), que incluye amortización de capitales inmovilizados en stocks:

$$\begin{aligned} \text{Máx (A)} = & \sum_n \sum_j \left[ \sum_m p_{jm} \cdot \left[ \sum_l y_{jlnm} + \sum_i Y_{ijnm} \right] - \sum_l (c_{ij} \cdot x_{ijn}) - \sum_{il} q_{ij} \cdot f_{iljn} - \right. \\ & \left. - \sum_{lm} s_{lm} \cdot y_{jlnm} - \sum_{im} r_{im} \cdot Y_{ijnm} - \sum_{i'l} t_{i'l} \cdot z_{i'ljn} - (\alpha / 12) \cdot (p_{jm}) \cdot \left( \sum_l F_{ij n} + \sum_l E_{lj n} \right) \right]. \end{aligned}$$

La optimización por programación lineal puede hacerse tomando como variables ventas ( $Y, y$ ), producciones ( $x, X$ ), envíos ( $Z, f$ ), y existencias a lo largo de un año ( $F, E$ ); o bien partiendo de existencias iniciales ( $F, E$ ) para el mes en que se calcula y obteniendo existencias posteriores. Permite, pues, una actualización.

Se trata, en el fondo, del problema de almacenes superpuesto al de transporte. Se pueden incluir fácilmente entre los productos  $j$  las materias primas, aunque no siempre se podrán mezclar con los productos finales en el mismo almacén (en general en sacos). Esto se resolvería distinguiendo entre diversos tipos de almacenes.

El modelo es sugestivo, pero expongamos las razones o defectos por las cuales no intentamos llevarlo a la práctica.

En primer lugar, el número de variables es enorme, aunque suprimamos todas las que son nulas *a priori*, como productos que no se fabrican en una determinada fábrica, o envíos imposibles por la distancia (coste del producto, unas 2 000 ptas./T., contra 1,3 ptas./Km. T.). Por tanto, exigiría simplificaciones, agrupando productos y lugares de destino, y aun así muchas horas de un ordenador grande. Los ordenadores con memoria en discos magnéticos, pueden manejar un número poco limitado de

variables en programación lineal (500 en algún caso a costa del tiempo de ejecución). Se trata sólo de una cuestión de dinero que si hubiese sido debidamente presentada y justificada hubiese sido probablemente aprobada (del orden de 100 000 ptas.)

La obtención de datos válidos en el año siguiente es un obstáculo mucho más serio, por su número y por tratarse de apreciaciones de futuro, que dependen de la buena intuición de los agentes de ventas y de los especialistas de programación comercial. El paso de la intuición de una persona, imprecisa pero rica en matices a unos números, trae un empobrecimiento de la información. Convendría, pues, tantear algunas posibles hipótesis para ver cómo influyen los datos en los resultados.

La elaboración del primer modelo sería larga (cuatro a seis meses). Requeriría colaboradores (más difíciles de obtener que dinero). Si el modelo se explotase con regularidad y puestas a punto (cambiando datos y existencias iniciales en los almacenes, por ejemplo) requeriría por lo menos un titulado para su explotación o bien inmovilizar a su autor durante años.

El beneficio de usar el modelo es difícil de evaluar. Se trata de recoger en pocos números la intuición de muchas personas para luego indicar unas cifras de fabricación y de transporte mes a mes a comparar con las preconizadas intuitivamente por los responsables, pues no reemplazarían a estas últimas. Eso requiere un trabajo bastante importante (de una persona formada con criterio y de opinión respetada). Puede tener la virtud de crear un procedimiento administrativo nuevo que ponga en evidencia y corrija defectos de planificación, algunos de los cuales pueden ser corregidos por el sentido común sin necesidad de modelos matemáticos. Desde luego harían falta más datos y personas con criterio para propugnar políticas a seguir, especialmente en inversiones futuras.

Un problema delicado es que se trata de crear un tinglado caro y ocupando personas en posición de "staff", para mejorar eventualmente algo que hacen ya personas en la línea. Como no se pasó del croquis sólo se pueden hacer conjeturas sobre los resultados.

Sin embargo, se han usado modelos matemáticos mucho más complicados para aplicaciones en las cuales se podrían dar conclusiones sin ellos. Por ejemplo, en planes de explotación de sistemas hidráulicos; así el modelo para el valle del Ica, en Perú, realizado por la empresa española E.D.E.S., descrito por su autor José Cuenca Bartolomé en la REVISTA DE OBRAS PUBLICAS núm. 3 038, junio del 68, interviniendo el Ministerio de Obras Públicas del Perú, y considerándose el aprovechamiento combinado desde un punto de vista económico.

Para un tal estudio hacen falta representantes responsables del usuario (Ministerio de O.P. del Perú), especialistas en Hdráulica con tiempo disponible, programadores que libren a los anteriores del trabajo rutinario y pesado (pero satisfactoriamente pagado) de enfrentarse con el ordenador hasta que los últimos puntos y comas del programa estén perfectos y bastante tiempo hasta que funcione el programa. Después es cuestión de criterio ingenieril el hacer tanteos con el programa, recogiendo el fruto de ver cómo funcionaría el modelo en la realidad y sus consecuencias económicas (250 tanteos de dos minutos de ordenador en este caso). Aunque el artículo citado no dice lo que debió costar poner a punto el programa parece que se trata de un caso muy rentable; aparte de los resultados de optimización, el hacerlos en presencia de personas que vayan a participar en el proyecto o en la dirección de obra y de explotación parece muy conveniente por el criterio que seguramente adquieren en el tema tratado, más matizado que en la lectura de un informe.

En los Estados Unidos se hacen muchos estudios de este tipo. No parece extraño que no tengan miedo a gastos en ordenador en ese país (donde por otra parte se justifican puntualmente todos los gastos), usándose terminales de ordenador para trabajos que en España se harían con máquinas de mesa (y una ojeada a las listas de ventas y pedidos de las casas de computadores grandes o de mesa permite ver que España, habida cuenta de los recursos no es nada retrógrada en este aspecto y tal vez sea más lanzada que algún país europeo que pareciera tener más tradición tecnológica); pero sí es notable, sin embargo, el que formen rápidamente grupos de trabajo de profesionales muy diversos para actividades no tradicionales (en España existe también hoy en día un notable dinamismo en este aspecto en las empresas de proyectos). Alguna revista responsable afirma que la Investigación Operativa es causa del 1 por 100 de aumento de la renta nacional de los U.S.A.; o sea, parte notable del 4 por 100 de aumento anual de ésta (opinión que no podemos comprobar). Así recordamos un estudio muy complicado sobre el futuro tráfico de Boston y el medio mejor de solucionarlo (propugnaban una especie de vías de Metro que se usaban en coches especiales particulares), en el que intervinieron muchos especialistas de ramas diversas; una divulgación del extenso informe consecuente está en el Scientific American, con una discusión poco después, en septiembre de 1969, de un urbanista, sosteniendo que las mejores soluciones eran "vivir cerca de donde se trabaja" y similares....

En definitiva existen unos métodos complicados de elaboración, que requieren profesionales diversos (entendidos en la materia y programadores de cualificación varia), que necesitan tiempo, pero que pueden ser útiles si su posterior explotación es extensa. Es recomendable que asista a la explotación final un futuro usuario del informe del trabajo y que no se escatime en ella, pues su costo en trabajo es muy inferior a la de la preparación del modelo, aunque las tarifas puedan suponer a veces un precio proporcional al número de tanteos, como hemos visto en un ejemplo muy especial de cálculo de estructuras que requirió hacer un programa para el caso; una tarifa binómica, incluyendo ambos costes de hacer el modelo elevado y de cada tanteo parece mejor.

#### B) *Un modelo a semejanza de la regulación de ríos.*

El modelo anterior no pasó del nivel del croquis. Sin embargo, por ser las capacidades de almacenaje un dato importante propusimos el siguiente, que mide la capacidad de regulación en cada almacén a partir de los consumos acumulados de modo parecido a como se miden capacidades de regulación para los ríos.

Desde hacía ya bastante tiempo, la contabilidad de la Compañía estaba mecanizada; es decir, en un cierto momento del proceso administrativo, los datos de facturas, movimientos de materiales, etc., pasan de hojas escritas a fichas perforadas o cintas magnéticas que pueden ser leídas e impresas por diversos aparatos, en general con capacidad de cálculo, el más versátil de los cuales es el ordenador digital, que puede sacar cualquier conclusión lógica o matemática de los datos introducidos a gran velocidad y sin errores de máquina. En particular, el ordenador actualiza cuentas y da balance, pero también puede sacar estadísticas más o menos condensadas. La capacidad de estas máquinas para sacar grandes listados de papel hace aconsejable no imprimir más que los resultados a utilizar, sobre todo habida cuenta que calcula mucho más de prisa que imprime. La programación se

hace en un lenguaje simbólico rígido, D.O.S. (Disc Operating System), que pone en movimiento diversos aparatos de entrada y salida del ordenador por mando electrónico y da orden de ejecutar ciertos programas —las siglas D.O.S. cambian con la marca de la máquina— y C.O.B.O.L. (Comercial Oriented Basical Operating Language), con el que se hacen los programas. Alguna otra empresa usa lenguaje simbólico (tipo ASSEMBLER) para programar mejor con más trabajo y menores tiempos de ejecución.

Los ordenadores son bastante engorrosos de programar, y una mecanización de la Administración se hace en varias etapas que suelen durar años, siendo obligados una codificación de productos, clientes y similares y un paso a un soporte tal como ficha perforada de partes de los documentos habituales. Simultáneamente se crea un equipo de especialistas (perforistas, programadores, etc.) de origen interno o contratados fuera. Cada paso debe de ser dado sin comprometer los sucesivos.

En el estado en que estaba la compañía de mecanización se disponía como producto del proceso administrativo de unas bandas magnéticas con los movimientos de productos en cuanto a salidas de fábrica, movimientos, entre almacenes y facturas de ventas. Figuran estos datos como sucesión de "bits" a lo largo de la banda magnética, en un orden preestablecido, de modo que un programa permite a la máquina identificar lógicamente cada dato.

Por tanto, es relativamente fácil sumar los productos de tipos afines por su modo de fabricación (superfosfato, complejos, nitrato amónico, etc.). En efecto, una fábrica dada tiene cierta libertad para cambiar de producto dentro de un mismo grupo, siendo su capacidad de producción limitada (en general amplia) y siendo conveniente que la fabricación sea uniforme como primera medida.

Si el objetivo es saber qué almacenes hay que tener, esas agrupaciones pueden ser suficientes e incluso pueden sumarse varios productos, especialmente los más variados que se venden sólo por sacos.

Para ese fin bastan sumas por fábricas y por razones de consumo, de ventas o salidas mensuales de cada grupo de productos.

En cada zona de consumo para cada grupo de productos podemos tener, pues, la serie de ventas de fábrica o almacén o de salidas de fábrica,  $F_i$ , donde  $i$  de 1 a 12 indicaría el mes.

A partir de estas listas, y con un único programa, se puede hallar la capacidad de regulación necesaria en el supuesto de abastecimiento o de producción constante  $F_m$  que parece técnicamente bueno como primera aproximación.

Para ello basta con hallar  $F_m = \sum_{i=1}^{12} F_i / 12$ , los 12 valores de  $E_i =$  (contenido del almacén si fuese nulo el stock a primero de año, al final del mes  $i$ )  $= \sum_{j=1}^i (F_m - F_j)$ .

Como el stock no debe de ser negativo (indicaría ventas no realizadas), el contenido mínimo a principio de año para abastecer el mercado —supuesto que el año que se estudia no hubo déficit de ventas por falta de almacén— es pues  $\min_i (E_i)$ , y será negativo. Los contenidos óptimos son  $P_i = E_i - \min_i (E_i)$ , anulándose en algún mes.

Es bastante fácil hacer una sucesión de programas para que salgan las cantidades anteriores en una presentación dada. Estos programas pueden ser hechos por las mismas personas que hacen los programas comerciales, bastando darles unas

indicaciones no mucho más detalladas que las escritas aquí. El plazo para tener los resultados es siempre mucho más largo del que parece: un mes de dedicación parcial de un analista si tuviese los datos.

El modelo es análogo al de la regulación de un río, siendo la producción de fábrica la magnitud que se corresponde con la salida continua del río, las ventas correspondientes con las aportaciones, ambas aleatorias, los stocks con las cantidades embalsadas, los volúmenes de almacenes con los volúmenes de embalse.

La utilidad de la información obtenida sería, únicamente, ofrecer unas estadísticas del pasado a Ventas y a Planificación comercial para que éstas tomen mejor medidas para el futuro, calibrando lo mucho que deja en el aire éste método de estimar las cantidades de almacenamiento necesarias, especialmente en cuanto a los cambios de consumo de la competencia y de las instalaciones propias. Es mucho más viable que el anterior, pues no requiere ni presupuesto ni personal especial.

### III. ALGUNAS CONCLUSIONES

El conocimiento y la técnica avanzan usando modelos matemáticos. Estos pueden ser hoy día muy complicados, requiriéndose un montaje adecuado para su elaboración y explotación en el que hacen falta entendidos en la materia, especialistas en ordenadores si se usan éstos. Los métodos de cálculo de hoy en día permiten considerar, como prácticamente ejecutables, muchos de los modelos que se puedan imaginar; es un aumento de posibilidades que hace saltar la imaginación, no sin obligar muchas veces a pararse ante la cuantía de los medios necesarios. Muchas veces la complejidad de ejecución ha hecho tomar la difícil decisión de parar trabajos que llevaban consumidas centenares de horas en resolver problemas de programación de una categoría intelectual secundaria.

En general, para hacer modelos complicados con ordenador, hacen falta varias personas con un jefe, y es corriente que algún titulado del grupo tenga que hacer una tarea fastidiosa sin las satisfacciones que se derivan de hacer un trabajo de categoría. Probablemente esta satisfacción debe darla un espíritu de grupo que haga recaer en algún modo los méritos sobre todos.

De todos modos, el tener una idea sobre estos modelos va a formar pronto parte de lo que debe saber un técnico o simplemente una persona culta.

Puede verse en la revista *Economía Industrial* núm. 70, octubre de 1969, un artículo de don Carlos Mendoza Gimeno (Presidente de U.N.E.S.A.) sobre una aplicación de la Programación lineal a la planificación de la energía española.