

EVALUACION DE LA ESTRUCTURA OPTIMA DE UNA FLOTA  
DE TRANSPORTES DE CRUDOS

J. BORELL J.M. GIRO

Se resumen algunas experiencias reales de modelización de las actividades -- de transporte y refino de crudo en una gran empresa petrolífera. En la fase descrita se analizan las ventajas e inconvenientes relativos de las distintas estructuras de flota, desde el punto de vista del tamaño de las unidades que la componen, en función de las posibilidades geopolíticas de utilización de rutas alternativas (acceso al Canal de Suez y utilización del pipe-line - SUMED).

Se describe la elaboración de un TSP ("tentative shipping plan"), tomando en consideración los costes unitarios de transporte (decrecientes con el tonelaje), frente a los efectos negativos de la concentración de costes financieros.

Su planteamiento resolutivo aparece como un programa lineal mixto multietapa de elevadas dimensiones y estructura cambiante en función de las condiciones políticas y económicas de cada momento. Un sistema de generación automática de matrices y de informes posibilita una eficaz interacción con sus usuarios.

## 1. INTRODUCCION

El transporte de su materia prima ha cobrado, para las empresas de refino, una importancia vital, no solamente para asegurar sus aprovisionamientos sino por concentrarse en esta actividad las posibilidades de desarrollar una gestión estratégica determinante con respecto a sus resultados económicos.

En efecto, la adquisición de crudos se está desarrollando en un mercado cada vez más rígido donde el comprador posee un margen de maniobra muy reducido. La comercialización del producto destilado, cuando existe un monopolio de distribución, como en el caso de España, con precios y cantidades determinados administrativamente, tampoco es un campo donde una gestión estratégica hábil tenga la oportunidad de obtener brillantes resultados. En cambio, los aspectos logísticos de la planificación coordinada de la producción-transporte-financiación, constituyen un campo de complejas interrelaciones entre actividades mutuamente dependientes donde se dispone de mayores grados de libertad institucional y donde los resultados de una buena o mala gestión son determinantes.

El uso de la programación lineal continua en la planificación de las actividades de refino es ya clásico. En cambio, el análisis matemático de las actividades de transporte no ha sido tan frecuente en la práctica. La mayor complejidad de la modelización de este tipo de actividades (necesidad de un planteamiento de variables mixtas, problemas dinámicos aperiódicos y de determinación de calendarios de actividades, etc) y su menor impacto relativo en el balance global, explican que generalmente no hayan sido objeto de un análisis más sofisticado que el de la aplicación de la regla "a tonelajes crecientes costes unitarios decrecientes".

Es obvio que, desde el punto de vista de los costes de transporte, y olvidando la dimensión temporal del problema, el regimen de aprovisionamientos ideal consiste en utilizar los mayores buques compatibles con los límites físicos de los puertos y las capacidades de tancaje disponibles. Sin embargo, desde el punto de vista de los costes de stockaje y financieros asociados, lo ideal sería suministrar en régimen continuo el crudo necesario a las necesidades instantáneas de la producción.

- J. Borrell y J.M. Giró del Departamento de Informática Técnica e Investigación Operativa. Compañía Española de Petróleos, S.A. Avda. de América, 32. Madrid - 2.  
- Article rebut el Juny del 1978.  
- Revisat l'Octubre del 1978.

Mientras los costes financieros asociados al valor de la materia prima inmovilizada en tránsito o residente eran bajos, los costes de transporte dominaban la estrategia de aprovisionamiento. Pero el aumento del precio del crudo, la diversificación de los aprovisionamientos y las modificaciones físicas y políticas en las rutas alternativas (Cierre de Suez y apertura del pipe-line SUMED que une el mar Rojo con Alejandria) han obligado a un análisis más detallado del problema. Todo ello sin olvidar los factores institucionales de protección al pebello nacional y de disponibilidad de flota propia por parte de las compañías de refino frente a los distintos tipos de contratación (time-charter, spot, etc...), en el mercado de fletes.

De esta problemática se derivan, esquemáticamente, dos tipos de cuestiones:

- La determinación de la composición óptima de una flota a adquirir o contratar.
- La utilización de una flota dada.

En la segunda dominan las cuestiones de determinación de calendarios y se precisa desarrollar el análisis con una dimensión temporal muy detallada. En la primera dominan las consideraciones estructurales y se precisa un análisis temporal menos profundo.

En realidad, ninguno de ellos se presenta suficientemente aislado en la práctica. Todas las compañías de refino disponen de buques propios o contratados a largo plazo y todas recurren a la contratación "spot" (por un solo viaje). Pero es preciso conocer la talla idónea de los buques a contratar "spot", mientras que los buques propios cuyo tonelaje no sea adecuado a una estructura de aprovisionamientos-producción pueden ser intercambiados o repletados.

Por ello, este artículo se limita a plantear la forma en la que se formula un TSP que fije las directrices a medio plazo de una política de transporte. Sus hipótesis básicas son las siguientes:

- a) La compañía de refino no posee flota propia.

- b) Toda la capacidad de transporte que se precise se obtiene contratándola spot en el mercado internacional.
- c) No existen límites en el número, tamaño o momento de contratación de los buques que se precisen.
- d) Se conocen los fletes en ptas/tonelada, de cada tipo de barco en cada ruta.
- e) Se conocen los contratos mensuales de retiradas de crudo, las necesidades mensuales de aprovisionamiento de las refinerías y los stocks iniciales de éstas.
- f) No existe ningún mecanismo institucional compensador del flete por tipo de bandera (protección a la bandera nacional).
- g) Se supone que es posible utilizar SUMED o el Canal de Suez.
- h) La gama de tonelajes de los barcos a contratar se supone dividida en y representada por una serie de tipos de tonelaje.

Con ello se pretende determinar la composición y utilización de la flota óptima a lo largo de un año, detallando su estructura y actividad en períodos individualizados de un mes.

El impacto de la actividad transporte sobre la marcha productiva de las refinerías se analiza exclusivamente desde una óptica de factibilidad.

## 2. ANALISIS FUNCIONAL

Como fase previa al desarrollo matemático de un modelo de optimización, se describen esquemáticamente las funciones desarrolladas por los distintos centros que integran la estructura de una compañía de refino, los tipos de decisiones que intervienen en las actividades analizadas, sus interrelaciones y los flujos de información que se generan y transmiten.

### SUJETOS

Se considera la existencia de tres centros de decisión, denominados respectivamente:

CDCF: Centro Determinador Composición Flota (Flotador).  
 CCC : Centro Contratador de Crudos (Contratante).  
 CPAP: Centro Planificador Anual Producción (Planificador).

I.- A partir del plan anual de producción y de una estructura dada de tancaje en las refinерías, el CPAP define al CCC, a principios de año:

- Las cantidades de cada tipo de crudo - de las que se precisa disponer en cada refinерía en cada mes del año.

PROCESO

El proceso idealizado, en el que intervienen los tres agentes citados, se esquematiza en la fig. 1. En ella se consideran 3 fases, lógica y cronológicamente ordenadas de la siguiente forma:

II.- El CCC contrata los suministros de crudo precisos para satisfacer dichas necesidades dentro de las disponibilidades del mercado.

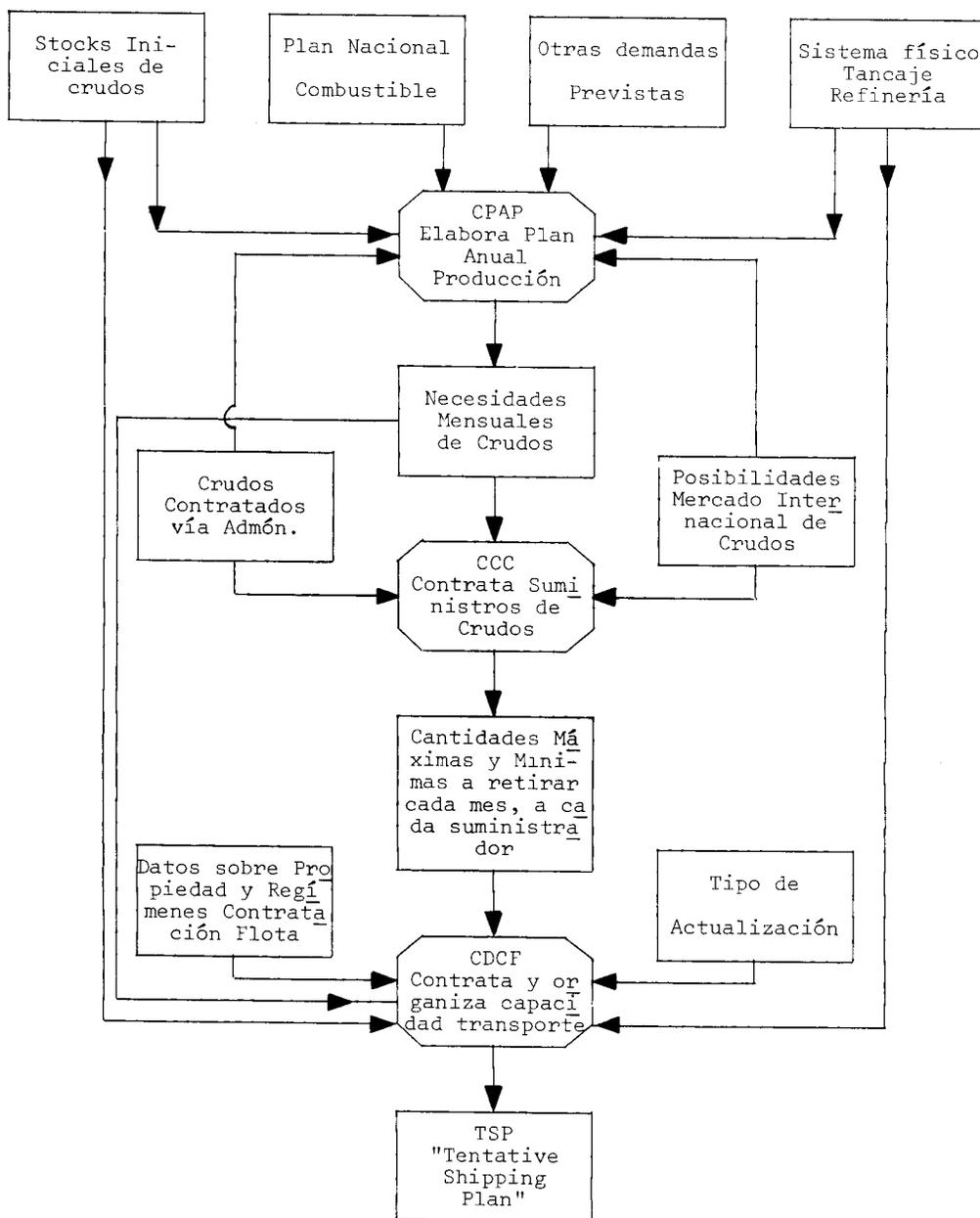


Fig. 1. Proceso funcional idealizado

Como consecuencia de tales contratos, - el CCC comunica al CDCF las cantidades de cada crudo, máximas y mínimas o fijas, que la flota deberá retirar durante cada mes, de cada puerto suministrador.

III.- a) De acuerdo con esta información, el CDCF debe elaborar un TSP ("tentative shipping plan") que:

- satisfaga los requerimientos de su ministros a referinerías definidos por CPAP.
- respete las restricciones representadas por el plan de suministros elaborados por CCC.
- represente el mínimo coste de transporte y de otros factores que se tomen explícitamente en consideración (impacto financiero de los pagos, etc.).

b) El TSP incluye la determinación de las combinaciones cargamentos rutas-tipos de barco a efectuar por el plan óptimo de transporte.

Especifiquemos que:

- Un cargamento se compone de uno o varios tipos de crudo, cuyo volumen total iguale aproximadamente a la capacidad del barco.
- Los barcos pueden realizar rutas con varios puertos de carga y varios puertos de descarga.
- En la elaboración del TSP, se considera la existencia de TNB tipos de barcos distintos (por clases-tipo de tonelaje), entre los que escoger la composición óptima de la flota.
- El CDCF conoce las limitaciones que las rutas y los puertos de origen y destino imponen a la posibilidad de utilizar ciertos tipos de barcos y/o cargamentos.

### 3. EL MODELO

El modelo a formular debe obtener el plan anual óptimo de transporte, desagregado mensualmente, expresado a través de una información que incluye:

a) Variables enteras: El número de barcos, de cada clase de tonelaje, cargados

- cada mes
- en cada zona de carga
- circulando por cada ruta

b) Variables continuas: Las cantidades, de cada tipo de crudo, cargadas

- cada mes
- en cada zona de carga
- con destino a cada refinería
- circulando por cada ruta
- en barcos de cada clase de tonelaje

La función objetivo que define el sentido del adjetivo "óptimo" es la de minimizar la suma de los costes de transporte y del valor actualizado al 1 de enero de los crudos suministrados a las refinerías. El valor de los cargamentos se supone abonado en el momento de su embarque (lo que equivaldría a suponer iguales condiciones de financiación para todos los proveedores), con lo que se penalizan las rutas de mayor duración en función de los mayores costes financieros asociados al correspondiente inmovilizado en tránsito. La concentración temporal de los suministros cuando éstos se transportan en petroleros de gran talla resulta también penalizada frente a las mayores distribuciones temporales que se obtendrían con planes de transporte instrumentados por unidades de menor tonelaje.

El plan de transporte resultante debe satisfacer las exigencias de retiradas fijadas por los contratos de suministro, facilitar los aprovisionamientos requeridos por las refinerías y respetar las posibilidades físicas de operación de los distintos tipos de buques, en las distintas rutas y en los distintos puertos.

Problemas de este tipo han sido tratados en distintas ocasiones, casi todas ellas a nivel técnico pero orientados a resolver planteamientos y objetivos diferentes. En la mayoría de los casos presentes en la literatura la dimensión y la composición de la flota era un dato conocido a priori y por lo tanto el problema se centraba fundamentalmente en los problemas de calendario asociados con la utilización óptima de dicha flota.

Este enfoque introduce restricciones muy abundantes, con submatrices particulares y -

segundos miembros nulos (ver Lasdon /1/), para asegurar que la ruta seguida por cada barco pueda dividirse en un conjunto de ciclos simples entre secuencias de puertos. La consideración de este tipo de formulaciones induce a procedimientos de descomposición como los tratados por Lasdon, /1/, de combinación de métodos de programación lineal y dinámica (Hartley /2/), o de programación lineal y simulación (Hydland /3/).

En nuestro planteamiento, la composición de la flota es uno de los principales resultados a obtener, y la contratación se realiza "spot", es decir por un solo viaje por unidad, con lo que no es preciso considerar los problemas de un calendario de actuación ni introducir las restricciones que aseguran que un petrolero no puede abandonar un puerto sin haber entrado previamente en él, salvo en el caso de una presituación inicial. Por otra parte, el hecho de que más de un tipo de petrolero deba ser considerado en la composición de la flota óptima, impide formularlo como un simple problema de flujo mínimo en una red tal y como lo han tratado Dantzig y Fulkerson.

Al no ser el problema de la utilización óptima de una flota dada, son también ociosas las consideraciones relativas al tiempo de disponibilidad global de las unidades de transporte y de la minimización de la fracción del mismo realmente empleado. En su lugar el problema ha sido formulado como un programa lineal mixto multiperíodo donde las variables enteras traducen el doble factor combinatorio del número de unidades de cada tipo que componen la flota óptima y su asignación a las distintas rutas alternativas que relacionan un mismo origen y destino. Este planteamiento puede obligar a generar, en función de la distribución geográfica y temporal de los suministros, un número de variables binarias tal que impida la solución numérica eficiente del modelo. A este problema nos referimos posteriormente en el punto 6.

La profundidad temporal del análisis desarrollado no distingue períodos de longitud inferior al mes. Por ello, las rutas asociadas a una misma combinación origen-destino se dividen en dos conjuntos ( $\Psi_1, \Psi_2$ ), correspondientes respectivamente a las de duración inferior y superior a 30 días. Ello se correspon-

de con la clara diferencia en la duración de las rutas al Pérsico según que estas sean -- via Cabo o via Suez (Canal o bien utilizando el SUMED).

La estructura de las ecuaciones y variables del modelo, formulado como un programa lineal mixto multietapa se detalla en el Apéndice 1.

#### 4. ESTRUCTURA DE LA INFORMACION Y SISTEMA DE GENERACION

Como puede deducirse de su planteamiento formal el modelo precisa ser alimentado con una información que reúne tres características fundamentales:

- procede de distintos centros de decisión.
- es muy numerosa y crece rápidamente con los niveles de desagregación adoptados.
- es estructurada, es decir, consta de parámetros del tipo si/no, compatible/incompatible, en función de cuyos valores aparecerán o no, conjuntos enteros de restricciones, grupos de variables y de términos de la función objetivo (como por ejemplo, apertura o cierre del canal de Suez, ampliación o cierre de un puerto, suspensión de un contrato, etc...).

La formulación del correspondiente programa, a partir de dicha información, debe ser rápida y fácilmente adaptable a las modificaciones estructurales producidas por cambiantes circunstancias políticas o físicas. Ello no puede conseguirse utilizando el sistema de definición de matrices empleado en los procedimientos INPUT de los lenguajes de programación lineal (FMPS, MPSX, etc...).

En su lugar, se ha empleado el lenguaje de generación de matrices Gamma 3 de Univac. De esta forma, los datos numéricos y condiciones estructurales definidos por los usuarios se disponen en forma de tablas y de listas mediante los que se generan las variables y parámetros del problema y se les atribuyen valores numéricos.

Para referenciar los elementos generados, se ha utilizado el siguiente sistema de índices, como aparece en la formulación del modelo:

ZONAS DE CARGA..... (I)

TIPOS DE BARCO..... (S)  
RUTAS..... (R)  
TIPOS DE CRUDO..... (P)  
PERIODOS MENSUALES..... (T)  
REFINERIAS..... (J)

A título de ejemplo (Tabla 1), se incluyen algunas de las tablas de datos y relaciones lógicas que alimentan el modelo

De esta forma se consigue una gran flexibilidad en la adaptación del modelo a una realidad cambiante. En particular, situaciones estructuralmente muy diferentes como el tener o no acceso a la utilización del Canal de Suez, apertura o cierre del pipe-line SUMED que bordea el Canal de Suez hasta la terminal de Alejandría, etc..., pueden ser analizadas sin más que modificar algunos elementos de determinadas tablas. Por ejemplo, el cierre del canal de Suez puede considerarse sin más que colocar un asterisco en la primera de las filas de la tabla de definición de las rutas consideradas, lo que sirve para que el sistema deje de generar todas las variables y restricciones asociadas con la posibilidad de utilizar tales rutas.

Asimismo, las variaciones numéricas en magnitudes físicas o económicas que intervienen en la definición del problema se incorporan mediante un simple cambio en el elemento de la tabla correspondiente, independientemente del número de coeficientes del programa en los que influya.

#### 5. RESULTADOS Y GENERACION DE INFORMES

La edición de los resultados debe fluir a través de sistemas más elaborados que las facilitadas por las rutinas SOLUTION o OUTPUT de los paquetes standard de P.L. El listado primal-dual por orden alfabético (u otro no relacionado con la estructura del problema) de las variables del modelo y de sus valores no puede utilizarse, sin elaboración previa, para la interacción con sus usuarios cuando se utilizan modelos de varios cientos de variables y donde las variables enteras aparecen bajo forma de expansión binaria.

Utilizando el sistema de generación automática de informes del Gamma 3 los resultados del modelo se obtienen de forma directamente

inteligible por los usuarios, resumiendo y agregando estructuralmente los valores de sus variables, coherentemente con la estructura de la hipótesis analizada.

A título de ejemplo (Tablas 2, 3 y 4) se muestra la estructura de los tipos de informes generados, por cantidades transportadas o por tipos de barcos utilizados, en cada período o globalmente.

#### 6. CONSIDERACIONES SOBRE LOS RESULTADOS Y LIMITACIONES DEL MODELO

La explícita toma en consideración de los costes financieros asociados al inmovilizado en tránsito, desplaza la composición óptima de la flota hacia unidades de menor tamaño que los máximos permitidos en el conjunto de rutas comunes a un origen y un destino, abandonándose así la regla de utilizar los mayores barcos compatible con los límites físicos de ciertas rutas.

Tal es el caso de los crudos procedentes del Golfo Pérsico, que pueden utilizar la ruta del Cabo o el pipe-line SUME (descargando un petrolero en la terminal del Sur del mismo y siendo recogido por otro en Alejandría para completar el viaje). Se observa que, para diferentes tipos de actualización, la estrategia óptima consiste en dotarse de barcos de 240.000 TPM (límite máximo de los que pueden operar en los terminales del SUMED) y utilizar dicho pipe, en vez de barcos de 270.000 o 300.000 utilizados en la ruta del Cabo.

El que ello sea así, a pesar de los menores costes unitarios de transporte en barcos de 300.000 Tm., es debido al impacto de los costes financieros en la distribución temporal de los suministros, asociados a la mayor duración de la ruta del Cabo.

Este efecto limitador no es imputable a la capacidad de tancaje en refinerías puesto que las restricciones de utilización del tancaje incorporadas al modelo no están saturadas en ninguno de los períodos considerados. Sin embargo, esta circunstancia es de significación limitada como analizaremos posteriormente.

Para los crudos para los que existe una úni-

Tabla 1.  
Algunos datos y relaciones lógicas del modelo

```

ERROR,9=OFF
ERROR,2=OFF
* GENERACION DEL PROGRAMA LINEAL DE

* EVALUACION ESTRUCTURA DE FLOTA
*****

* HIPOTESIS BASICAS

* TODA LA FLOTA SE CONTRATA SPOT

* PERIODOS MENSUALES

DATA
*
TABLE AUXILIO $ TABLA AUXILIAR COEFICIENTES BINARIOS
* B
2 2
1 1
*
TABLE TAMAN
* A B C D E F G H I J K
Z 25. 33. 50. 70. 100. 130. 150. 170. 240. 270. 300.
*
TABLE COSMPT,T=12 $ COSTE,EN PESETAS,DEL TRANSPORTE,
* POR TONELADA,EN BARCOS DE LA CLASE S POR
* LA RUTA R
* T A B C D E F G H I J K
* ARG-ALG 25. 33. 50. 70. 100.130.150.170.240.270.300
A ARG-ALG 230 175 137
B ARG-TEN 303 265 209
C ARG-ALG-TEN 325 284 223
D LIB-ALG 326 285 224 143 102
E LIB-TEN 431 377 296 188 135
F LIB-ALG-TEN 453 397 312 198 142
G CAR-ALG 440 352
H CAR-TEN 366 293
I CAR-ALG-TEN 454 364
J GPE-ALG(C-S)
K GPE-ALG(C-C) 1355 1252 887 678 417 365 344 313 282 261 250
L GPE-ALG(S-S) 879 822 624
M GPE-TEN(C-S)
N GPE-TEN(C-C) 1262 1165 825 631 388 340 320 291
O GPE-TEN(S-S) 963 899 679
P GP-AL-T(C-S)
Q GP-AL-T(C-C) 1372 1266 897 686 422 369 348 317 285
R GP-AL-T(S-S) 981 916 691
S GP-AL-T(SMD) 333 322 304 287
T GP-ALG(SMD) 298 288 272 256
U GP-TEN(SMD) 319 307 290 272
* 1. COMPATIBLE
* BLANCO= INCOMPATIBLE
*
(COSMPT,(A),(B)) = (COSMPT,(A),(B)) / 1000.
, FOR (A)=(COSMPT,*)

1: COMPATIBLE
BLANCO: INCOMPATIBLE

TABLE COMPBAZO ,T=7 $COMPATIBILIDAD TIPO BARCO-ZONA CARGA
* T 1 2 3 4
* GOLFO PERS. ARGELIA LIBIA CARIBE
A 25.000 1 1 1 1
B 33.000 1 1 1 1
C 50.000 1 1 1 1
D 80.000 1 1 1 1
E 100.000 1 1 1 1
F 130.000 1 1 1 1
G 150.000 1 1 1 1
H 170.000 1 1 1 1
I 240.000 1 1 1 1
J 270.000 1 1 1 1
K 300.000 1 1 1 1

1: COMPATIBLE
BLANCO INCOMPATIBLE

```

Tabla 1 (Cont)

TABLE COMPBARU, T=17		\$COMPATIBILIDAD TIPO BARCO - RUTA										
* T	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	
	25.33.	50.	70.	100.	130.	150.	170.	240	270.	300.		
A	ARGELIA-ALGECIRAS	1	1									
B	ARGELIA-TENERIFE	1	1									
C	ARGELIA-ALGS-TENE	1	1									
D	LIBIA -ALGECIRAS		1		1							
E	LIBIA -TENERIFE			1		1						
F	LIBIA-ALGS-TENER		1			1						
G	CARIBE-ALGECIRAS	1										
H	CARIBE-TENERIFE	1										
I	CARIBE-ALGS-TENER	1										
J	G.PERS-ALG(CA-SU)											
K	G.PERS-ALG(CA-CA)						1			1	1	
L	G.PERS-ALG(SU-SU)											
M	G.PERS-TEN(CA-SU)											
N	G.PERS-TEN(CA-CA)						1	1				
O	G.PERS-TEN(SU-SU)											
P	G.P-ALG-TEN(C-S)											
Q	G.P-ALG-TEN(C-C)							1	1			
R	G.P-ALG-TEN(S-S)											
S	G.P-ALG-TEN(SUMD)							1	1			
T	G.PERS-ALG(SUMD)							1	1			
U	G.PERS-TEN(SUMD)							1	1			

1: COMPATIBLE  
 BLANCO: INCOMPATIBLE

TABLE CONSREC, T=10		\$ CONSUMOS, POR PERIODO, DE LA REFINERIA TENERIFE DE CADA TIPO DE CRUDO									
* T	A	B	C	D	E	F	G	H	I		
	ARA	DUB	IRA	SAF	KIR	ARG	ZUT	MON	BOS		
E	ENERO	65.	100.	165.	50.	100.			25.	10.	

Tabla 2.  
 Ejemplo de informe generado

PLAN ANUAL DE TRANSPORTE-CONTRATACION SPOT  
 DATOS GLOBALES CUATRIMESTRE

NUMERO DE BARCOS

TIPOS DE BARCO

RUTAS	25.000	33.000	50.000	70.000	100.000	130.000	150.000	170.000	240.000	270.000	300.000
ARGELIA-ALGECIRAS		1.0	6.0								
LIBIA -ALGECIRAS					4.0						
CARIBE-TENERIFE		5.0									
G.PERS-ALG(CA-SU)											
G.PERS-ALG(CA-CA)											
G.PERS-ALG(SU-SU)											
G.PERS-TEN(CA-SU)											
G.PERS-TEN(CA-CA)											
G.PERS-TEN(SU-SU)											
G.P-ALG-TEN(C-S)											
G.P-ALG-TEN(C-C)											
G.P-ALG-TEN(S-S)											
G.P-ALG-TEN(SUMD)									1.0		
G.PERS-ALG(SUMD)										5.0	
G.PERS-TEN(SUMD)									11.0		
.....											
TOTAL		6.0	6.0		4.0				12.0	5.0	

Tabla 3.  
Ejemplo de informe generado

PLAN ANUAL DE TRANSPORTE-CONTRATACION SPOT  
MES DE ABRIL

NUMERO DE BARCOS

TIPOS DE BARCO

RUTAS	25.000	33.000	50.000	70.000	100.000	130.000	150.000	170.000	240.000	270.000	300.000
ARGELIA-ALGECIRAS			2.0								
LIBIA -ALGECIRAS					1.0						
CARIBE-TENERIFE		2.0									
G.PERS-ALG(CA-SU)											
G.PERS-ALG(CA-CA)											
G.PERS-ALG(SU-SU)											
G.PERS-TEN(CA-SU)											
G.PERS-TEN(CA-CA)											
G.PERS-TEN(SU-SU)											
G.P-ALG-TEN(C-S)											
G.P-ALG-TEN(C-C)											
G.P-ALG-TEN(S-S)											
G.P-ALG-TEN(SUMD)											
A.PERS-ALG(SUMD)									1.0		
G.PERS-TEN(SUMD)								3.0			
.....											
TOTAL		2.0	2.0		1.0			3.0	1.0		

Tabla 4.  
Ejemplo de informe generado

PLAN ANUAL DE TRANSPORTE-CONTRATACION SPOT  
MES DE ABRIL

CANTIDADES TRANSPORTADAS

TIPOS DE BARCO

RUTAS	DESTINOS	25.000	33.000	50.000	70.000	100.000	130.000	150.000	170.000	240.000	270.000	300.000
ARGELIA-ALGECIRAS	ALGECIRAS			100.0								
LIBIA -ALGECIRAS	ALGECIRAS					90.0						
CARIBE-TENERIFE	TENERIFE		66.0									
C.PERS-ALG(CA-SU)	ALGECIRAS											
G.PERS-ALG(CA-CA)	ALGECIRAS											
G.PERS-ALG(SU-SU)	ALGECIRAS											
G.PERS-TEN(CA-SU)	TENERIFE											
G.PERS-TEN(CA-CA)	TENERIFE											
G.PERS-TEN(SU-SU)	TENERIFE											
G.P-ALG-TEN(C-S)	TENERIFE											
G.P-ALG-TEN(C-S)	ALGECIRAS											
G.P-ALG-TEN(C-C)	TENERIFE											
G.P-ALG-TEN(C-C)	ALGECIRAS											
G.P-ALG-TEN(S-S)	TENERIFE											
G.P-ALG-TEN(S-S)	ALGECIRAS											
G.P-ALG-TEN(SUMD)	TENERIFE											
G.P-ALG-TEN(SUMD)	ALGECIRAS											
G.PERS-ALG(SUMD)	ALGECIRAS									240.0		
G.PERS-TEN(SUMD)	TENERIFE							510.0				
.....												
TOTAL		66.0	100.0		90.0			510.0	240.0			

ca ruta entre unas zonas de carga y las refinerías destino, el modelo escoge barcos de la mayor dimensión posible compatible con dicha ruta, salvo cuando es preciso completar con una unidad de menor tonelaje la cantidad contratada al suministrador.

Otra característica interesante de las soluciones obtenidas es el recurso a rutas multi-port de descarga (utilización de un mismo cargamento para suministrar varias refinerías en un solo viaje). De esta forma se distribuye el uso de grandes barcos entre las necesidades de aprovisionamiento de varias refinerías y se consigue hacer operar, a media carga, a petroleros que, de otra forma, no podrían hacerlo debido a las limitaciones de calado de los atraques de algunas refinerías. Las rutas multi-port poseen tarifas más elevadas, calculando el modelo los puntos de equilibrio entre el encarecimiento del transporte derivado de esta circunstancia y la disminución de los costes unitarios originados por la utilización de mayores tonelajes.

Frente al interés de la información que permite obtener acerca de las grandes opciones de una política de transporte, el modelo presenta limitaciones inherentes a su propia naturaleza y formulación, que son la causa de algunos comportamientos no realistas de sus resultados.

Entre ellos destaca la tendencia del modelo a minimizar, en cada período los stocks acumulados en refinerías, retrasando los suministros tanto como le sea posible, como consecuencia obvia de la función objetivo adoptada. Por ello se observa que, en los primeros períodos existen capacidades de transporte no saturadas (barcos viajando por debajo de su capacidad de carga).

Por otra parte, y como ya ha sido indicado, la capacidad de tancaje en refinerías no parece representar un factor limitativo de la estructura óptima de la flota.

Ello no es especialmente significativo, puesto que la longitud de los períodos considerados (un mes) no permite analizar la evolución de la utilización del tancaje con el necesario detalle temporal. El modelo no está diseñado para analizar, día a día, las saturaciones,

temporalmente localizadas, del tancaje de refinerías.

El impacto económico de dichas saturaciones, así como de los retrasos en las operaciones de descarga por ellas inducidos, debe analizarse mediante la toma en consideración de la evolución de stocks en refinerías (inmovilizado residente), y por lo tanto de la actividad de producción propiamente dicha. El control de los condicionamientos mutuos que las actividades de producción y transporte se imponen entre sí exige un análisis temporal más detallado de los problemas de rotación de la flota y su coordinación con los planes de producción.

Finalmente, si los problemas de análisis funcional de las actividades y de la formulación conceptual son importantes, no es posible olvidar las consideraciones numéricas. Modelos como el descrito obligan a resolver, para tener alguna utilidad real, programas mixtos con 200 variables enteras. Los códigos de programación mixta utilizados (FMPS, UNIVAC) admiten solamente problemas formulados en variables binarias, lo cual exige la expansión binaria de las variables enteras naturales del problema. Como consecuencia de ello aparecen combinaciones lineales de columnas en número lo suficientemente elevado como para producir problemas de inestabilidad numérica en los procesos de inversión instrumentados por las rutinas del optimizador SPRINT. La gravedad de dichos problemas numéricos se acentúa cuando el número de variables rebasa las 250, llegando a aumentar los mensajes "backwards-forwards discrepancy" hasta el punto de interrumpir el proceso de optimización con la edición del mensaje "numerical errors prevent further optimization".

Ante la imposibilidad de acceder al análisis del proceso interno de optimización llevado a cabo por el código, y dado que la gravedad del problema de inestabilidad numérica interrumpe el proceso a partir de las 250 variables, se ha resuelto el problema mediante la inclusión en el proceso de generación de variables y restricciones, de un análisis estimativo del número máximo de unidades de transporte de cada tipo que "a priori" debían poder ser asignados a las distintas actividades a realizar. En función de ello se limita grandemente la generación de variables bina-

rias a las que la solución óptima asignaría un valor nulo, consiguiéndose así mantener - el número de variables expandidas dentro de los límites operativos del código.

## 7. REFERENCIAS

- /1/ LASDON, L. "Decomposition of a ship routing problem" en D.M. HIMMELBLAU "Decomposition of large-scale problems".
- /2/ HARTLEY, H.O. "A tentative proposed for a shipping plan of bulk petroleum products by sea-going tankers". Texas Univ. (Project Themis), Technical Report nº 20.
- /3/ KYDLAND, F. "Simulation of linear operations". Institute for Shipping Research, Bergen, Noruega.

## 8. APENDICE 1

### Nomenclatura

Las variables y parámetros utilizados son -- los siguientes:

### Parámetros

- $STOIN_{(J)(P)}$  :  
Stock inicial del tipo de crudo (P) en la refinería (J).
  - $TANTORE_{(J)}$  :  
Capacidad total de tancaje de la refinería (J).
  - $TAMAXTCR_{(J)(P)}$  :  
Capacidad máxima de tancaje en la refinería (J) del tipo de crudo (P).
- $$\sum_{(P)} TAMAXTCR_{(J)(P)} \geq TANTORE_{(J)}$$
- $CONTRANU_{(I)(P)}$  :  
Cantidades anuales contratadas, de cada tipo de crudo (P), que deben ser retiradas - de cada zona de carga (I).
  - $CAREPUCMAX_{(I)(P)(T)}$  :  
Cantidades máximas, del tipo de crudo (P) que pueden ser retiradas, de la zona de --

carga (I) durante el período (T).

- $CAREPUCMIN_{(I)(P)(T)}$  :  
Cantidades mínimas, del tipo de crudo (P) que deben ser retiradas de la zona de carga (I) durante el período (T).
- $CONSREA_{(J)(P)(T)}$  :  
Consumo de la refinería (J) del tipo de -- crudo (P) durante el período (T) de acuerdo con su plan de producción.
- $COSMPT_{(S)(R)}$  :  
Coste del transporte de una tonelada de -- crudo, en barcos de la clase (S), por la - ruta (R).
- TETA :  
Tipo de actualización considerado.
- $PRECIO_{(I)(P)}$  :  
Precio de la tonelada del tipo de crudo -- (P) en la zona de carga (I).
- $DURRUT_{(R)}$  :  
Duración del viaje simple, por cada ruta - (R) expresada en fracciones de período. -- (El período considerado es el mes). Tal du ración se considera independiente del tipo de barco.
- $PUERTRU_{((I)U(J))(R)}$  :  
Parámetro de compatibilidad de la ruta (R) y el puerto de carga (I) o descarga (J).
- $COMPTCZO_{(P)(I)}$  :  
Id. Id. del tipo de crudo (P) y la zona de carga (I).
- $COMPBAZO_{(S)(I)}$  :  
Id. Id. del tipo de barco (S) y la zona de carga (J).
- $COMPBARU_{(S)(R)}$  :  
Id. Id. del tipo de barco (S) y la ruta -- (R).

### Variables

- $N_{(R)(S)(T)}$  :  
Número de barcos de la clase (S), asigna-- dos a la ruta (R) en el período (T).

-  $X_{(I)(J)(P)(T)(S)(R)}$ :

Cantidad, cargada en la zona de carga (I), con destino a la refinería (J), del tipo de crudo (P), en el período (T), en barcos de la clase (S), por la ruta (R).

-  $SI_{(J)(P)(Q)}$ :

Stock, al principio del período Q, del tipo de crudo (P) en la refinería (J)

( $Q=2, T+1$ ) (El conjunto de períodos Q incluye todos los períodos considerados menos el primero)

-  $TAMAN_{(S)}$ :

Capacidad de transporte de barcos de la clase (S).

### Objetivo

Con esta nomenclatura, la función objetivo - anteriormente enunciada, adopta la expresión:

$$\sum_{(I)} \sum_{(J)} \sum_{(T)} \sum_{(P)} \sum_{(S)} \sum_{(R)} \left[ (1+TETA)^{-T} \cdot PRECIO_{(I)(P)} \cdot \right. \\ \left. \begin{aligned} & \cdot X_{(I)(J)(P)(T)(S)(R)} + \\ & \text{las compras de crudo} \\ & + N_{(R)(S)(T)} \cdot TAMAN_{(S)} \cdot \\ & \text{(Coste del transporte)} \\ & \cdot COSMPT_{(S)(R)} \end{aligned} \right]$$

### Restricciones

La formulación de las restricciones anteriormente enunciadas es la siguiente:

a) Retirada de la cantidad anual contratada de cada tipo de crudo

$$\sum_{(J)} \sum_{(T)} \sum_{(S)} \sum_{(R)} X_{(I)(J)(P)(T)(S)(R)} = CONTRANU_{(I)(P)} \\ \forall (I) \quad (\text{Para cada zona de carga}) \\ \forall (P) \quad (\text{Para cada tipo de crudo})$$

b) Satisfacción de las cotas mensuales máximas y mínimas de las retiradas de crudo

$$\sum_{(J)} \sum_{(S)} \sum_{(R)} X_{(I)(J)(P)(T)(S)(R)} \leq CAREPUCMAX_{(I)(P)(T)}$$

$$\sum_{(J)} \sum_{(S)} \sum_{(R)} X_{(I)(J)(P)(T)(S)(R)} \geq CAREPUCMIN_{(I)(P)(T)} \\ \forall (I) \quad (\text{Para cada zona de carga}) \\ \forall (P) \quad (\text{Para cada tipo de crudo}) \\ \forall (T) \quad (\text{Para cada período})$$

c) Balance de stocks en refinerías. Incluye la necesidad de que cada refinería disponga, cada mes, por lo menos, la cantidad - de cada tipo de crudo especificada por su plan de producción:

$$SI_{(J)(P)(T)} + \sum_{(S)} \sum_{(RE\Psi_1)} \sum_{(I)} X_{(I)(J)(P)(T)(S)(R)} + \\ (\text{Stock inicial}) \quad (\text{Aportaciones cargadas el propio mes}) \\ + \sum_{(S)} \sum_{(RE\Psi_2)} \sum_{(I)} X_{(I)(J)(P)(T-1)(S)(R)} - \\ (\text{Aportaciones cargadas mes anterior})$$

-  $CONSREA_{(J)(P)(T)} = SI_{(J)(P)(T+1)}$

(Consumo refinería) (Stock inicio período siguiente)

$\forall (J)$  (Para cada refinería)  
 $\forall (P)$  (Para cada tipo de crudo)  
 $\forall (T \neq 1)$  (Para cada período distinto del primero)

$$STOIN_{(J)(P)} + \sum_{(S)} \sum_{(RE\Psi_1)} \sum_{(I)} X_{(I)(J)(P)(T)(S)(R)} - \\ (\text{Stock inicial}) \quad (\text{Aportaciones cargadas el propio mes})$$

-  $CONSREA_{(J)(P)(T)} = SI_{(J)(P)(T+1)}$

(Consumo refinería)

$\forall (J)$  (Para cada refinería)  
 $\forall (P)$  (Para cada tipo de crudo)  
 $T=1$  (Primer mes)

Donde:

$\Psi_1$ : Conjunto de rutas para las que la duración de un viaje simple es menor de un mes.

$\Psi_2$ : Conjunto de rutas para las que la duración de un viaje simple es mayor o igual a un mes.

d) No rebasamiento de las capacidades globales de tancaje

$$\sum_{(P)} SI_{(J)(P)(Q)} \leq TANTORE_{(J)}$$

$(Q=2, T+1)$

$\forall(J)$  (Para cada refinería)

$\forall(Q)$  (Para cada período)

e) No rebasamiento de las capacidades máximas de tancaje de cada tipo de crudo

$$SI_{(J)(P)(Q)} \leq TAMAXTCR_{(J)(P)}$$

$\forall(Q)$  (Para cada período)

f) El número de barcos asignados a cada ruta debe ser un número entero

$$TAMAN_{(S)} \cdot N_{(R)(S)(T)} - \sum_{(J)(P)} \sum_{(I)} X_{(I)(J)(P)(T)(S)(R)} \geq 0$$

$N_{(R)(S)(T)}$  entero

$\forall(R)$  (Para cada ruta)

$\forall(S)$  (Para cada tipo de barco)

$\forall(T)$  (Para cada período)

