

OPTIMACION DE UNA FLOTA DE VEHICULOS DE TRANSPORTE MEDIANTE LA APLICACION DE UN METODO PROBABILISTICO DE SIMULACION DE LA DEMANDA

Por **GONZALO ALVAREZ LASTRA**,
Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

JOAQUIN NAVARRO CAVANILLAS,
Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

MIGUEL ANGEL PESQUERA GONZALEZ,
Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

Los estudios y las aplicaciones de logística industrial se han impuesto en numerosos campos, entre los cuales el del transporte tiene para nosotros singular importancia. Por ello presentamos a continuación un interesante ejemplo de aplicación de estas técnicas a un caso real en este campo.

Para resolver un problema concreto de optimización de una flota de camiones-cisterna, destinados a distribuir productos petrolíferos, fue necesario diseñar un método de cálculo que tuviera en cuenta algunos aspectos específicos del problema tratado, como era la dispersión y escasa dimensión de los clientes, la aleatoriedad de la demanda y las necesidades comerciales de dar un servicio inmediato, sin posibilitar la realización de circuitos estables de distribución.

El procedimiento de cálculo que se puso a punto constaba de dos fases diferenciadas: en primer lugar, un modelo aleatorio de simulación de la demanda permitía obtener la distribución física y el volumen de pedidos a lo largo de un período de tiempo representativo. En segundo lugar, un método de análisis y selección de la flota óptima permitía deducir el número y tamaño de los camiones que eran necesarios.

Los resultados obtenidos por aplicación de ambas fases han resultado lo suficientemente satisfactorios como para programar un plan de inversiones en vehículos de transporte a plazo medio.

1. Introducción

La distribución terrestre de productos petrolíferos en un ámbito territorial (islas de Gran Canaria y Tenerife) sometido a fuertes relaciones de competitividad entre las empresas distribuidoras no puede ser estudiada en base a un esquema tradicional de programación lineal.

Ello es así porque, en primer lugar, los clientes presentan una dimensión reducida y muy dispersa, por lo que la propia complejidad del problema de programación lineal, que obligaría a manejar un

número muy elevado de ecuaciones, reduciría la operatividad del mismo, pues gran parte de los resultados no serían relevantes bajo un punto de vista práctico. En segundo lugar, la pequeña capacidad de almacenaje de los clientes y la irregularidad del consumo impiden un espaciamiento regular de los pedidos, por lo que la demanda toma carácter aleatorio. En tercer lugar, las fuertes relaciones de competencia antes citadas obligan al distribuidor a servir a sus clientes prácticamente "a la demanda", sin que parezca viable, salvo en algunos casos muy concretos, establecer circuitos de distribución "a priori": la estrategia debe modificarse cada día para que medie el menor número posible de horas entre el pedido del cliente y el servicio del mismo.

Ha habido que desarrollar, por lo tanto, una metodología específica, original en muchos de sus aspectos, que se explica detalladamente a continuación.

2. Esquema metodológico general

La metodología que se ha elaborado trata de cubrir dos principales objetivos: analizar el grado de adecuación del sistema de transporte y distribución existente frente a la demanda que se viene produciendo y definir una política de optimización de la flota de cara a un horizonte temporal determinado.

Para cubrir ambos objetivos se actuó en dos etapas sucesivas. Una primera de **simulación** de la demanda de productos y una segunda de **análisis y optimización** de la oferta de transporte.

Como será explicado más adelante, el modelo de simulación adoptado permitió conocer la distribución diaria de la demanda en un mes-tipo, suministrando información sobre cuáles son los núcleos que solicitan envíos y en qué cuantía, para cada día del mes-tipo.

A partir de dichos gastos se establecían unas rutas **diarias** de distribución, variables con los núcleos que solicitaban pedidos en un día determinado, en función de las cuales se estudiaba la adecuación de la flota existente a las exigencias de la demanda y se podía abordar la optimización de la misma.

Conviene indicar aquí que, a causa de la escasa fiabilidad de los datos de costes del transporte de que se disponía en el caso particular para el que fue diseñado este procedimiento de cálculo, la

OPTIMACION DE UNA FLOTA DE VEHICULOS DE TRANSPORTE...

optimización fue realizada en base a los tiempos de operación. Es evidente que, para un vehículo dado (o para una flota de distribución dada), los costes de operación son proporcionales a los tiempos de operación, suponiendo que no existen grandes distorsiones en relación al óptimo de utilización.

Una vez expuestas las líneas generales de la metodología adoptada, se procede, en los párrafos siguientes, a describir en detalle sus fases principales.

3. Modelo de simulación de la demanda

Para disponer de unos datos representativos de la demanda diaria de productos al nivel requerido para el estudio día a día de la flota de camiones de distribución, teniendo en cuenta la aleatoriedad de dicha demanda, se hace necesario arbitrar un procedimiento que permita pasar de valores medios en un periodo determinado (por ejemplo, un mes) a valores diarios probables.

Tal procedimiento consiste en crear un modelo aleatorio de simulación de la demanda que, partiendo de valores medios, genere los consumos diarios correspondientes a la situación existente y permita estimar los mismos consumos diarios para un año horizonte, en función de las previsiones globales de crecimiento.

A partir de tal información se podrá dimensionar la flota necesaria para abastecer dichos consumos o, en su defecto, conocer las cantidades demandadas que pueden quedar sin servir un día punta, para una flota determinada.

3.1. Fundamento teórico

Se admite que la demanda solicitada por cada núcleo de consumo sigue un proceso de Poisson, ya que se puede aproximar que se cumplen las hipótesis siguientes:

1. La probabilidad de que se produzcan un determinado número de pedidos n en un intervalo t no depende nada más que del intervalo de tiempo t , y no depende por tanto del instante t_0 a partir del cual se mide t .

2. La historia del proceso en tiempo anterior al intervalo t no influye en el número de pedidos que acaecerán en el intervalo t .

3. La probabilidad de que en un intervalo dt se registre un pedido (suceso de Poisson) es proporcional a dt (hipótesis de regularidad).

Entre las dos vertientes posibles de analizar el proceso de Poisson se ha elegido aquella que analiza la variable continua θ : **tiempo que transcurre entre dos pedidos consecutivos**.

Su función de distribución $F(x)$ es:

$$F(x) = \text{Prob}(\theta < x)$$

$$1 - F(x) = 1 - \text{Prob}(\theta \leq x) = \text{Prob}(\theta > x) = e^{-\lambda x}$$

$$F(x) = 1 - e^{-\lambda x}$$

Siendo λ para el caso considerado la tasa de pedidos por unidad de tiempo (que se toma igual a la hora).

Si se conoce $F(x)$ se puede calcular x : **tiempo de demora entre dos pedidos**.

$$x = \frac{1}{\lambda} \text{Ln} [1 - F(x)]$$

$F(x)$ se simula a partir de la distribución uniforme en el intervalo (0,1), la cual es generada automáticamente por una subrutina cableada del sistema 2200-C (WANG). Esta subrutina consiste simplemente en poder acceder a un número entre 0 y 1 de una tabla de números aleatorios en el que todos tienen igual probabilidad de salir (distribución uniforme); cada vez que se desea conocer un x se obtiene el tiempo transcurrido en producirse un nuevo pedido respecto al anterior.

Para un núcleo i se obtendría la siguiente sucesión de pedidos con intervalos h_i diferentes (figura 1).

Los pedidos que se registran durante un determinado intervalo de tiempo (día) en todos los núcleos, para un producto determinado, se obtienen mediante la unión de los correspondientes a los n núcleos considerados.

Ahora bien, como se sabe que la función $F(x)$ es reproductiva, la suma (A) de los procesos poissonianos para los núcleos 1, 2, ..., n , también es de poisson, con parámetro:

$$\lambda = \sum_{i=1}^n \lambda_i$$

lo cual simplifica el problema reduciéndolo a los pasos siguientes:

1. Simulando $F(x) = 1 - e^{-\sum \lambda_i X}$

$$x = -\frac{1}{\sum \lambda_i} \text{Ln} [1 - F(x)]$$

se obtienen los intervalos de tiempo transcurridos entre cada dos pedidos para los n núcleos.

2. Una vez determinado un pedido, se hace necesario hallar a qué núcleo pertenece, para lo

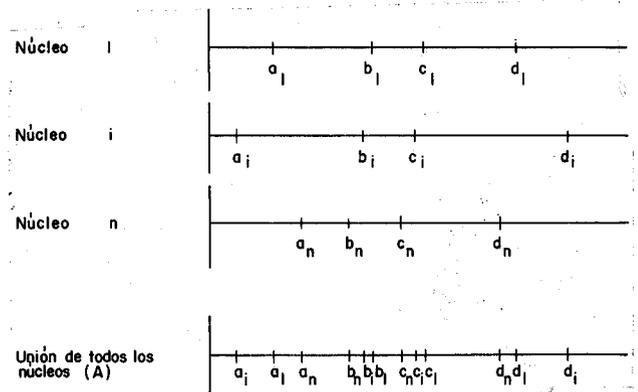


FIGURA 1

OPTIMACION DE UNA FLOTA DE VEHICULOS DE TRANSPORTE...

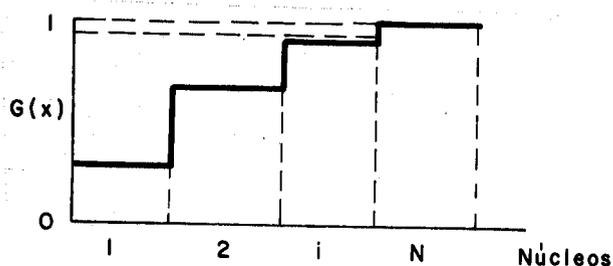


FIGURA 2

cual se simula la función discreta de distribución $G(x)$, de la forma que se indica en la figura 2, donde cada escalón es la suma acumulada de los anteriores $\lambda_i / \sum \lambda_i$, de forma que si el valor de $G(x)$ corresponde al intervalo N , será a este núcleo al que se le asignará el pedido.

El organigrama general del proceso se indica en la figura 3. El programa de cálculo, redactado en lenguaje "BASIC" y procesado en un sistema WANG 2200-C se incluye más adelante.

3.2. Datos básicos

Para que el modelo de simulación sea operativo, es necesario disponer de una serie de datos que definan las condiciones de demanda de los diferentes núcleos de consumo. Tales datos básicos son: la tasa de pedidos por núcleo y el consumo medio por pedido, también en cada núcleo.

Tasa de pedidos por núcleo

Se considera como pedido idóneo de un cliente aislado, los dos tercios de la capacidad de su correspondiente depósito. El número mensual de pedidos será, en consecuencia:

$$\text{Número mensual de pedidos por cliente} =$$

$$\frac{\text{consumo general}}{2/3 \text{ capacidad depósito}}$$

2/3 capacidad depósito

Si se supone que el núcleo considerado agrupa un total de N clientes aislados, se tendrá que:

$$\text{Tasa mensual de pedidos por núcleo} =$$

$$\frac{\sum_{\text{cliente } 1}^{\text{cliente } N} \text{núm. mensual pedidos por cliente}}{N}$$

La tasa horaria de pedidos por núcleos se obtiene inmediatamente dividiendo la tasa mensual por el número de horas laborables de un mes. Dado que un mes constaba, para el caso concreto al que se aplicó el procedimiento aquí expuesto, de 184 horas laborables (equivalentes a 23 días laborables al mes), se obtiene que:

$$\text{Tasa horaria de pedidos por núcleo} =$$

$$\frac{\text{Tasa mensual de pedidos por núcleo}}{184}$$

184

Consumo medio por pedido y núcleo

Para cada núcleo el consumo medio por pedido es la media ponderada de los consumos por pedido de cada cliente individual.

$$\text{Consumo medio} =$$

$$\frac{\sum_{\text{cliente } 1}^{\text{cliente } N} \left(\frac{\text{consumo por pedido}}{\text{cliente } i} \right) \cdot (\text{n.º pedidos cliente } i)}{\sum_{\text{cliente } 1}^{\text{cliente } N} (\text{n.º pedidos cliente } i)}$$

$$\text{cliente } N$$

$$\sum (\text{n.º pedidos})$$

$$\text{cliente } 1$$

$$\text{cliente } i$$

siendo N , como en el caso anterior, el número de clientes con que cuenta el núcleo correspondiente.

3.3. Output del modelo de simulación

Aplicado el programa de simulación, con los

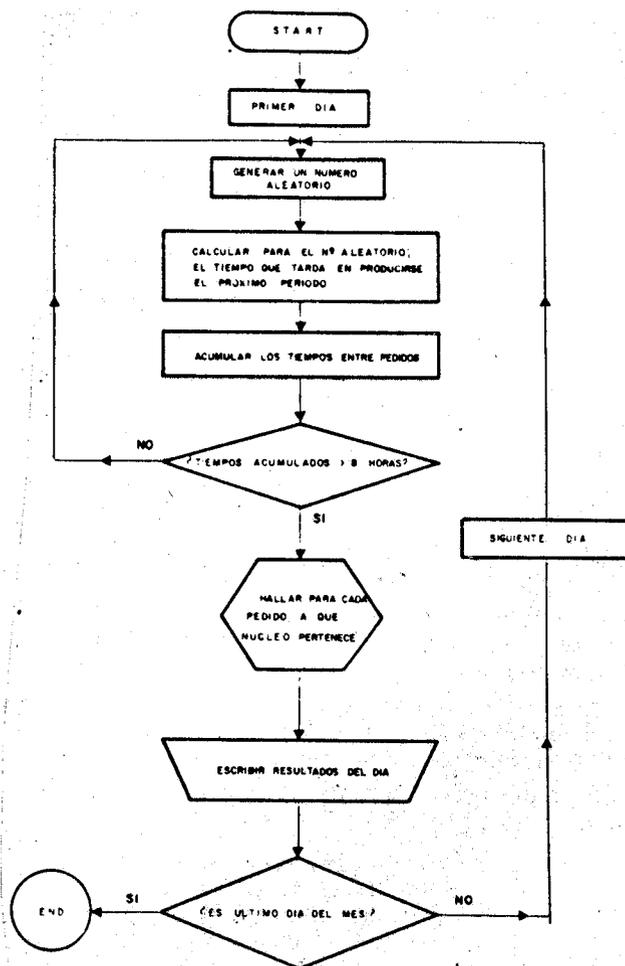


FIGURA 3

OPTIMACION DE UNA FLOTA DE VEHICULOS DE TRANSPORTE...

necesarios datos básicos antes descritos, se obtiene el siguiente formato de salida, por días:

	Dia T	
Núcleo	Pedidos	Consumo total
N	P	C

Siendo:

T = Número indicador del día, comprendido entre 1 y 23, que son los días laborables equivalentes de un mes medio.

N = Núcleo de población que solicita productos en el día T.

P = Número de pedidos solicitados dicho día por el núcleo N.

C = Consumo total solicitado por el núcleo N, obtenido como producto del número total de pedidos (P) por la demanda media por pedido para dicho núcleo.

4. Modelo de optimación

Los resultados de la simulación serán, a su vez, datos básicos de un procedimiento de análisis de la flota de camiones basado en los tiempos totales de distribución.

Para llegar a optimizar la flota de vehículos será necesario realizar dos fases intermedias, que se describen en los dos subapartados siguientes. Una vez obtenidos los resultados de la segunda de dichas fases se estará en disposición de definir la flota óptima de distribución.

4.1. Cálculo del tiempo total de distribución

Un elemento fundamental dentro del modelo de optimación de la distribución es el cálculo de los tiempos totales de distribución. La metodología que se aplica con este objeto es la siguiente:

a) Establecimiento de itinerarios independientes de distribución en base a la localización geográfica de los núcleos de consumo.

b) Cálculo de las distancias virtuales desde factoría a los núcleos de consumo, así como las velocidades medias de transporte.

Para ello se han establecido cuatro niveles de calidad de las carreteras existentes, de acuerdo con las condiciones físicas de las mismas, I.M.D., etc.

Las velocidades tipo correspondientes a cada nivel son las siguientes:

- Nivel I: 40 Km/h.
- Nivel II: 25 Km/h.
- Nivel III: 20 Km/h.
- Nivel IV: 15 Km/h.

Para cada recorrido entre factoría y núcleo de consumo se adopta una única velocidad media y una distancia de recorrido, ponderando bien las

velocidades-tipo o bien las distancias equivalentes.

c) Reducción de los núcleos de un itinerario a un nucleoide (centroide).

El nucleoide representativo de los núcleos de consumo del itinerario toma, para la distancia, velocidades de transporte, número de clientes y consumo, los siguientes valores:

Distancia del nucleoide al origen

$$d = \frac{\sum_{i=1}^n d_i c_i}{\sum_{i=1}^n c_i}$$

Siendo:

i = núcleo

c_i = consumo total del núcleo i en el día

d_i = distancia virtual del núcleo i al origen de distribución.

Velocidad media de transporte del nucleoide

$$V_m = \frac{\sum_{i=1}^n V_i C_i}{\sum_{i=1}^n C_i}$$

Siendo:

V_i = Velocidad media de transporte del núcleo.

Número de clientes del nucleoide.

Es igual a la suma de clientes de los núcleos integrantes.

Demanda total del nucleoide.

Es igual a la suma de demandas de los núcleos integrantes.

d) Obtención del número de viajes al nucleoide, como cociente entre la demanda total diaria del nucleoide y la capacidad del vehículo de transporte.

e) Cálculo del tiempo total de distribución.

Los diversos sumandos integrantes del tiempo total de distribución son los siguientes:

— Tiempo total de descarga (TTD).

— Tiempo total de carga (TTC).

OPTIMACION DE UNA FLOTA DE VEHICULOS DE TRANSPORTE...

— Tiempo total en factoría (TTF) que, admitiendo un consumo de 0,10 horas en cada viaje, será igual al número de viajes \times 0,10.

— Tiempo total en clientes (TTCL) que, en el mismo supuesto, será igual al número de clientes \times 0,10.

— Tiempo total de rodadura (TTR) que será igual al número de viajes $\times 2 \frac{d}{V_m}$

La expresión del tiempo total de distribución (TT) será por lo tanto la siguiente:

$$TT = TTD + TTC + TTF + TTCL + TTR$$

4.2. Análisis de la flota

Conocido el procedimiento de cálculo del tiempo de distribución, el siguiente paso consiste en efectuar un análisis de la flota de vehículos bajo el punto de vista del tiempo empleado.

Se opera de la siguiente manera: fijado de antemano el parque de vehículos de reparto asignado a cada producto y obtenido por el modelo de simulación el consumo diario de los distintos nucleoides, se calcula el número de viajes que precisa realizar el primer camión.

Si el tiempo total de distribución es menor de ocho horas, la distribución es factible y el proceso queda terminado. Será preciso, en todo caso, comprobar si es posible utilizar un camión más ligero o los tiempos sobrantes de otros vehículos, como se verá en el subapartado siguiente.

Si por el contrario el tiempo de distribución es superior a ocho horas, el exceso de tiempo se asignaría al segundo camión disponible, iterando el procedimiento hasta lograr que las necesidades diarias de distribución puedan realizarse dentro de la jornada laboral.

Como output o resultado del análisis de la flota se obtendrá, para cada flota ensayada, el tiempo no utilizado de la jornada laboral o la demanda no servida en dicha jornada.

El organigrama general del proceso del análisis de la flota se indica en la figura 4.

El programa completo de cálculo, redactado en lenguaje "BASIC" y procesado en un sistema WANG 2200-C se incluye más adelante.

4.3. Selección de la flota óptima

Por medio del método de análisis de la flota antes descrito se puede comprobar si es posible distribuir toda la demanda de un día en la jornada de trabajo, para una flota de vehículos determinada.

Variando la composición de la flota pueden compararse las reducciones de jornadas-hombre o de horas-coche, o sus incrementos, con el tiempo disponible o la demanda no servida, deduciéndose las oportunas conclusiones tendientes a optimizar el proceso.

Si se parte del parque de vehículos en servicio, el procedimiento permite obtener el tiempo estricto

que se requiere para efectuar la distribución con los niveles previstos de calidad.

Pero también el citado método puede ser utilizado para analizar el efecto que producen sobre el proceso de distribución determinadas modificaciones en el parque, aumentando o reduciendo el número de vehículos o variando las capacidades de transporte o el producto transportado. Las modificaciones del parque que generen menos necesidades de jornadas-hombre y de horas-coche definirán la flota óptima.

Para lograr que sea operativo el proceso de selección se ha dispuesto un cuadro de salida, al final del programa de análisis de la flota, que permite obtener, con una periodicidad mensual, la siguiente información:

- Composición del parque analizado
- Horas-vehículo mensuales
- Vehículos-Km. mensuales

y fundamentalmente:

— Horas-extra que sería necesario realizar (además de las horas-vehículo realmente realizadas en el mes) para atender toda la demanda generada en el mes considerado.

- O bien, horas disponibles a lo largo del mes.

Realizando la simulación de la demanda durante un suficiente número de meses, se obtendrán unos valores medios de los anteriores parámetros que serán representativos del caso analizado.

Si el número de horas-extra o de horas disponibles permanece dentro de límites tolerables (un máximo de dos por camión y día), el caso analizado puede ser considerado aceptable.

Si el número de horas-extra es excesivo, será necesario analizar nuevos casos en los que se recurra al doble turno de trabajo o en los que se plantee el incremento del parque o la sustitución de alguno de los vehículos más antiguos.

En caso de que sea excesivo el número de horas disponibles, habrá que proponer medidas de reducción del parque de vehículos, acompañadas de otras de racionalización del servicio.

5. Programas de cálculo

Los programas de cálculo correspondientes al modelo de simulación de la demanda y al modelo de optimización se presentan agrupados, a efectos operativos, en un único listado que se recoge seguidamente bajo el título "programa principal".

Solamente queda excluido del "programa principal" el programa auxiliar de obtención de los datos básicos (tasas de pedido, consumo medio por pedido), que presenta en un listado aparte.

Como ya ha quedado dicho con anterioridad, los programas han sido realizados en lenguaje "BASIC" y procesados en un sistema WANG 2200-C.

Los listados del "programa principal" y del "programa de datos básicos" se reproducen en los cuadros 1 y 2 que acompañan al presente texto.

OPTIMACION DE UNA FLOTA DE VEHICULOS DE TRANSPORTE...

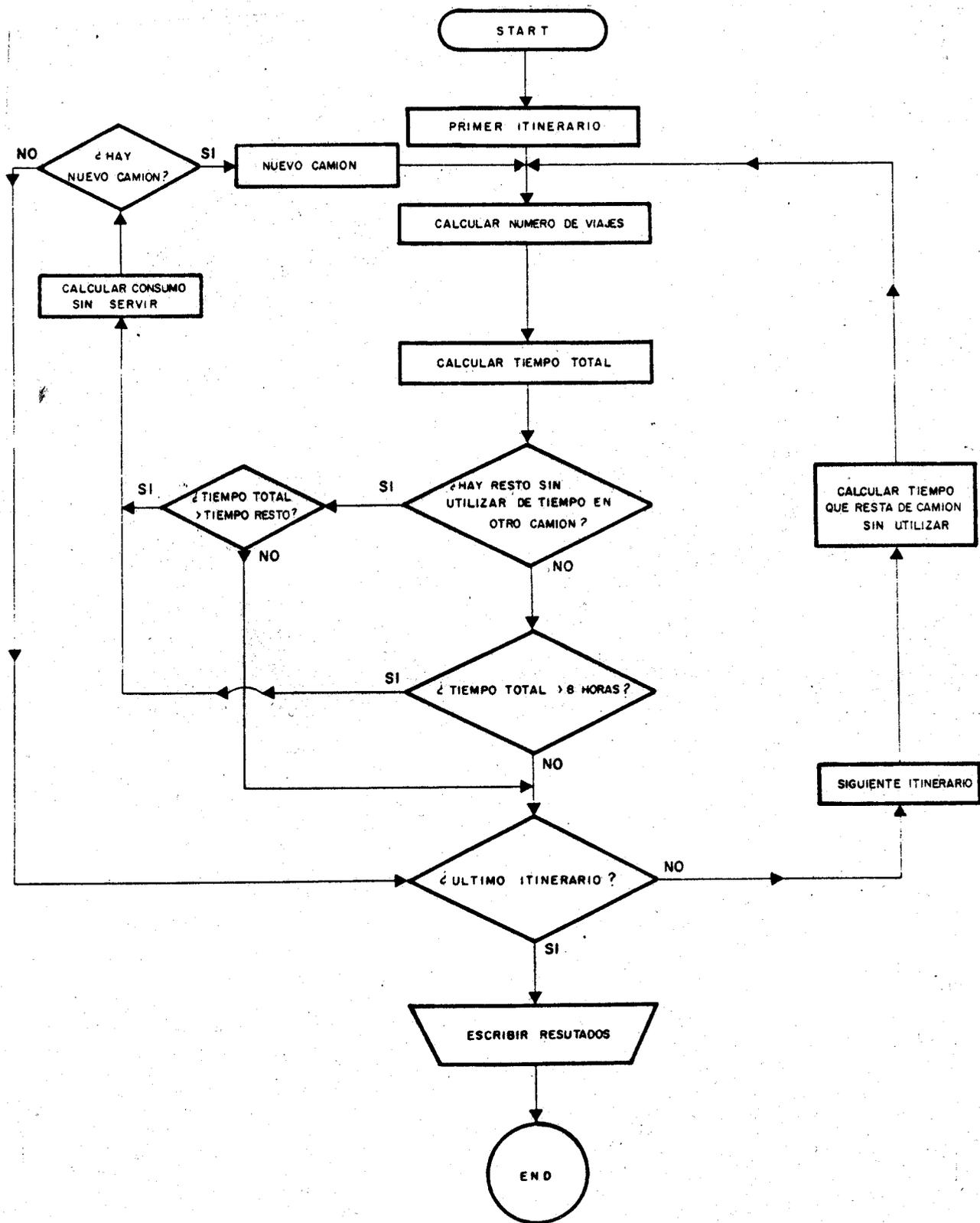


FIGURA 4

OPTIMACION DE UNA FLOTA DE VEHICULOS DE TRANSPORTE...

La flota asignada a la distribución de propano estaba constituida por dos camiones de 4,28 Tm. de capacidad de carga, con velocidades de carga y descarga, respectivamente, de 5,0 Tm/h. y 3,9 Tm/hora.

Una vez aplicado el modelo de simulación de la demanda y el de análisis de la flota se obtuvieron, para la situación actual, los siguientes resultados:

	Media	Desviación standard
Horas-vehículo mensuales.	324	10
Horas-vehículo mensuales.	324	10
Vehículos-Km. mensuales.	5.982	101
Horas-extra mensuales	77	35

La simulación se realizó, día a día, durante un número de meses suficientemente representativo. En el cuadro 4 se recogen los resultados de uno de los días simulados y en el cuadro 5 el resumen correspondiente a uno de los meses completos a los que se extendió el análisis.

Los anteriores valores numéricos revelaban, de acuerdo con la situación real que se había constatado, que el parque estaba ligeramente infradimensionado, debiendo realizarse de 2 a 5 horas extra diariamente para mantener los niveles de servicio exigidos (servicio del pedido al día siguiente, como máximo de la recepción del mismo).

De cara al horizonte 1980 se admitió un incremento medio de la demanda del 15 %. Fueron probadas diversas composiciones de flota, correspondientes a las siguientes alternativas:

DIA 6			
NUCLEO	PEDIDOS	CONS.	TOTAL (TM)
1	1		0.750
5	1		2.195
8	1		0.867
9	1		1.578
22	1		0.850
26	1		1.501
31	1		0.666
38	4		5.681
ITINERARIO	1		
DIST. VIRTUAL=	39.9	VEL. VIRTUAL=36.3	CONS. TOTAL= 5.1 N. CLIENTES=
ITINERARIO	2		
DIST. VIRTUAL=	29.7	VEL. VIRTUAL=35.4	CONS. TOTAL= 8.9 N. CLIENTES=
ITINERARIO	1		
ULTIMO CAMION	1		
TIEMPO UTILIZADO ULTIMO CAMION			5.03
ITINERARIO	2		
ULTIMO CAMION	2		
TIEMPO UTILIZADO ULTIMO CAMION			4.87
HORAS EXTRA	8.85		

CUADRO 4

EJEMPLO DE SIMULACION DIARIA

OPTIMACION DE UNA FLOTA DE VEHICULOS DE TRANSPORTE...

- Mantenimiento de la flota actual (2 camiones de 4,28 Tm. de capacidad de carga).
- Mantenimiento de la flota actual, realizándose doble turno con uno de los vehículos.
- Sustitución de uno de los camiones actuales por otro de mejores prestaciones (10 Tm. de capacidad de carga y velocidades de carga y descarga, respectivamente, de 10 Tm/hora y 7,8 Tm/hora).
- Ampliación de la flota actual añadiendo un camión de 6,06 Tm. de capacidad.

No se simularon otras alternativas intermedias, ya que así lo aconsejaba el análisis de los resultados parciales de cada simulación.

Los resultados que se obtuvieron oscilaban entre los correspondientes al mantenimiento de la flota actual (situación más desfavorable bajo el punto de vista del servicio) cuyos resultados promedios fueron los siguientes:

	Media	Desviación standard
Horas-vehículo mensuales.	335	
Vehículos-Km. mensuales	6.627	352
Horas-extra mensuales ...	153	42

y la alternativa de sustitución de un camión por otro de mejores prestaciones, que resultó la más favorable bajo el punto de vista del servicio con los siguientes resultados:

	Media	Desviación standard
Horas-vehículo mensuales.	267	
Horas-vehículo mensuales.	267	17
Vehículos-Km. mensuales.	4.614	638
H. disponibles mensuales.	37	41

Finalmente, la consideración de otros criterios de elección, como fueron:

- costes de explotación
- política laboral de la empresa
- política de inversiones
- situación del mercado
- saldo de material en otras áreas servidas por la empresa.

hicieron preferible la alternativa señalada anteriormente en último lugar.

PROPHNO

RESUMEN MENSUAL

CAMION	CAPAC. (TN)	V. CARGA(TN/H)	V. DESCARGA(TN/H)
1	4.28	5.0	3.9
2	4.28	5.0	3.9

CAMION	KMS-VEHICULO	HORAS-VEHICULO
1	3351.1	181.6
2	2744.7	152.6

TOTAL HORAS EXTRA MENSUALES 116.58

REALIZADAS CON VEHICULO DE LAS SIGUIENTES CARACTERISTICAS

CAPACIDAD(TN)= 4.28 V. CARGA(TN/H)= 5.00 V. DESCARGA(TN/H)= 3.90

CUADRO 5

EJEMPLO DE SIMULACION MENSUAL