

PLANIFICACION DE PUERTOS(*)

Por CESAR LOPEZ SANCHEZ

Ing. de Caminos, Canales y Puertos.

Una de las actividades más importantes en toda empresa es la de la planificación, entendida como la función consistente en seleccionar entre una serie de alternativas los objetivos, directrices, programas y presupuestos de una empresa, determinando el curso de acción para alcanzar los fines propuestos. En el artículo que se presenta a continuación se hace un estudio de la planificación de puertos, abordándose primeramente la metodología a seguir: investigación de datos, análisis de los mismos, previsión de tráfico, dimensiones y ordenamiento del puerto, cronogramas, rentabilidad, tarificación y control. A continuación se estudian los métodos de planificación empíricos o matemáticos, bien sean éstos analíticos o de simulación.

1. Concepto.

Los organizadores de empresas definen la planificación, como la función consistente en seleccionar entre una serie de alternativas, los objetivos, directrices, programas y presupuestos de una empresa, determinando el curso de acción para alcanzar los fines propuestos. Como quiera que planificar es anticiparse al futuro, la planificación se basa necesariamente en un pronóstico. De aquí que la confianza en la planificación sea tanto mayor cuanto menor o más próximo esté el horizonte para el que se realiza. Este carácter incierto de la planificación, hace necesario el control del desarrollo de la misma, que debe de gozar siempre de cierta flexibilidad, precisamente para poder actuar sobre ella adaptándola a las circunstancias del presente.

Según sea el horizonte para el que se planifica distinguiremos tres fases en la planificación:

- Corto plazo; período de hasta dos años.
- Medio plazo; hasta cinco años.
- Largo plazo; hasta diez años, o también el período de amortización de la inversión, que puede ser variable, llegando a los veinticinco e incluso a los cincuenta años.

(*) Se admiten comentarios sobre el presente artículo, que pueden remitirse a la Redacción de esta Revista hasta el 28 de febrero de 1974.

De un estudio de planificación realizado consecutivamente en sus tres fases de corto, medio y largo plazo surge la idea de planificación en continuo. Definimos como planificación dinámica aquella que se realiza para una sucesión continua de años.

2. Metodología del estudio.

El estudio de planificación de un puerto consta de los siguientes estudios parciales:

1. Investigación de datos.

El estudio comienza con una campaña de pesquisas y obtención de datos actuales y de planes futuros existentes del puerto y de su zona de influencia, comprendiendo al menos:

— Aspectos físicos y técnicos del puerto:

- Localización.
- Oceanografía y meteorología.
- Geología y geotecnia.
- Accesos marítimos.
- Obras de abrigo.
- Superficies marítimas.
- Obras de atraque.
- Accesos terrestres.
- Superficies terrestres.
- Parques de estacionamiento y de clasificación.

Superficie de depósito y almacenamiento.

Instalaciones especiales de almacenamiento.

Equipos para movimiento de mercancía.

Equipos flotantes.

Equipos ferroviarios.

Equipos y vehículos auxiliares.

Instalaciones generales y de suministro.

Servicios generales.

Instalaciones de reparaciones navales.

— Aspectos económicos y de organización del puerto:

Estadísticas de tráfico de mercancías (volumen y origen y destino).

Estadísticas de tráfico de buques.

Régimen de explotación de los transportes terrestres.

Mano de obra.

Sistema operacional del puerto.

Organización administrativa.

Reservas disponibles de terrenos.

Sistema tarifario.

Sistema contable y financiero.

Costes de explotación.

— Planes existentes:

De expansión del puerto.

De creación de infraestructura e industria en la zona de influencia.

— Aspectos socio-económicos de la zona de influencia:

Delimitación.

Demografía.

Producción y empleo.

Sectores productivos.

Comercio exterior.

2. *Análisis de la información obtenida.*

La segunda fase del estudio consiste en el análisis de la información obtenida definiendo:

— Infraestructura portuaria; limitaciones.

— Infraestructura viaria; desarrollo.

— Diagnóstico del estado actual del puerto.

3. *Previsión de tráficos.*

Con los datos obtenidos en el apartado 1 y elaborados en el 2 tenemos el punto inicial de partida del siguiente estudio de previsión de tráficos:

— Previsión del tráfico de mercancías:

Flujos actuales.

Tráfico procedente del crecimiento vegetativo.

Tráfico derivado de los planes de desarrollo económico de la zona de influencia.

Tráfico inducido por la expansión del puerto.

Tráfico captado de otros puertos.

— Previsión del tráfico marítimo.

Tamaño óptimo y composición de la flota para cada tipo de mercancía previsto.

— Previsión del tráfico terrestre.

Descomposición de toneladas para carretera y ferrocarril.

4. *Factores modificantes.*

Las proyecciones de tráfico anteriores son el punto inicial de partida del estudio de planificación, y de su calidad depende la del estudio. Por ello hay que analizar los factores de carácter externo que pueden modificarlas:

— Físicos.

— Tendencias de los modos de transporte marítimos.

— Tendencias de los modos de transporte terrestres.

— Valor del suelo.

— Laborales.

— Legales.

— Financieros.

— Fiscales.

— Político-económicos.

5. *Dimensionamiento y ordenación del puerto.*

Establecidas las previsiones de tráfico la siguiente fase del estudio es el dimensionamiento de la capacidad de los medios y servicios por-

tuarios y la ordenación del conjunto. Este estudio es la base para el establecimiento cronológico de necesidades.

6. *Cronograma de realizaciones.*

El plan de expansión del puerto queda plasmado en el cronograma de realizaciones, que nos define de forma gráfica el crecimiento del mismo.

7. *Cronograma de inversiones.*

Es el resultado final del estudio de dimensionamiento y nos define las necesidades financieras del desarrollo portuario.

8. *Estudio de rentabilidad.*

Distinguiremos entre rentabilidad económica y social. Respecto a la primera, se determinan los índices financieros característicos:

- Índice de rentabilidad.
- Índice de recuperación del capital.

9. *Plan de tarificación.*

Con base al estudio anterior de rentabilidad se determina la política tarifaria del puerto.

10. *Plan de control.*

Todo el estudio de planificación debe ser susceptible de revisarse, por lo que se debe prever un modelo de desarrollo, con controles periódicos, que comprueban el estado actual del puerto en cada momento, en el que se efectúa la revisión y permitan corregir la planificación primaria.

De los diez capítulos en que hemos dividido el estudio de planificación, de particular importancia es el quinto, por ser una expresión directa de las técnicas de explotación de puertos.

El dimensionamiento de un puerto se puede realizar siguiendo diferentes métodos; basándonos en el carácter de éstos precisamente, vamos a diferenciar los estudios de planificación como se expone seguidamente.

3. **Métodos de planificación de puertos.**

Hemos visto cómo los estudios de planificación de puertos pueden diferenciarse con los diferentes métodos de dimensionamiento de la capacidad de los servicios portuarios. Atendiendo, pues a estos últimos, podemos hacer una tentativa de clasificación de la siguiente manera:

- Métodos basados en la experiencia recogida de la explotación de puertos existentes, o métodos empíricos de planificación.
- Métodos basados en la elaboración y estudio de modelos matemáticos del sistema portuario, o métodos matemáticos de planificación.

Los métodos empíricos definen unos ratios, que para cada servicio y cada tonelaje de mercancía operada nos dan la dimensión normal para éste, proporcionando una explotación futura ágil y normal. Estos métodos no toman en consideración la economía de la explotación (al no considerar los costes tanto de explotación como de implantación), la dimensión obtenida puede resultar en cada caso concreto no económica.

Los métodos matemáticos experimentan situaciones del sistema portuario a través de modelos matemáticos del mismo. Su fundamento consiste en minimizar los costes de la operación función de dichas situaciones. Por sistema portuario entendemos el conjunto de elementos y actividades que concurren en la operación portuaria de transbordo de mercancías entre los modos de transporte marítimos y terrestres. Considerando la forma de experimentación o de cálculo sobre el modelo, bien sea análisis matemático, bien cálculo numérico, se nos presenta un nuevo encuadramiento:

- Métodos analíticos.
- Métodos numéricos.

3.1. Métodos empíricos de planificación de puertos. — La utilización de los puertos es muy variada, y según sea ésta resultan unas necesidades de servicios diferentes. Un índice ca-

racterístico de la utilización de un puerto es el definido como:

$$I_u = \frac{T_m}{\text{T.R.N.}} =$$

$$= \frac{\text{toneladas de mercancía movida al año}}{\text{toneladas de registro neto de los buques servidos}}$$

Para un puerto comercial, que será el tipo que desarrollaremos como ejemplo, el valor de este índice es, aproximadamente, 0,50.

El puerto comercial se caracteriza por estar dedicado al servicio de la mercancía y de la cadena del transporte; tiene como misión fundamental facilitar el paso de la mercancía del modo de transporte marítimo al terrestre y viceversa, y por tanto, debe concederse la máxima atención a las instalaciones y servicios terrestres y marítimos, para que aseguren una manipulación eficaz de la mercancía y el acceso de ambos modos de transporte al recinto portuario.

Centrado el tema, pues, en los puertos comerciales, los primeros índices a tomar en consideración son los relativos a las superficies generales. Estos índices nos definen las áreas que hay que destinar a antepuertos y dársenas (marítimas), a zona de operaciones y almacenes y a accesos terrestres.

La superficie de agua puede tener, en términos generales, una forma cualquiera, pero debe diferenciarse en una zona de antepuerto y otra de dársenas; el ratio para la superficie de agua es:

$$\frac{S_a}{\text{T.R.N.}} = 0,125,$$

donde S_a viene expresada en m^2 .

En el establecimiento de las superficies terrestres intervienen una serie de factores muy diversos, tales como: forma de transporte de la mercancía, tiempo de estancia en almacén, características de los modos de transporte, métodos de explotación, etc. En líneas generales se puede decir, no obstante, y sobre todo en lo que se refiere a superficies de operación, que el cálculo de necesidades terrestres está íntimamente ligado al de la longitud de muelles.

Hoy en día, el estándar de zona de operaciones es: primeros 20 m, a partir del cantil para la operación; 50 m siguientes, para almacén de tránsito; 20 m siguientes, para vía de

circulación; 60 m siguientes, para almacén de segunda zona; 30 m siguientes, para vía posterior. En total, 180 a 200 m. El ratio para la superficie terrestre es:

$$\frac{S_t}{T_m} = 0,125,$$

donde S_t viene expresada en m^2 .

La superficie terrestre destinada a operación y almacenes viene definida por el ratio:

$$\frac{S_{oa}}{T_m} = 0,060;$$

S_{oa} en m^2 .

La superficie terrestre destinada a ferrocarril, incluso parques de clasificación, viene definida por el ratio:

$$\frac{S_f}{T_f} = 1,250;$$

S_f en m^2 .

La superficie terrestre destinada a carreteras, incluso parques de estacionamiento viene definida por el ratio:

$$\frac{S_c}{T_c} = 1,050;$$

S_c en m^2 .

La longitud de muelles viene definida por el ratio:

$$\frac{L_m}{T_m} = 0,00125;$$

L_m en m.

La longitud de vías de ferrocarril viene definida por el ratio:

$$\frac{L_v}{L_m} = 10.$$

La longitud de carreteras viene definida por el ratio:

$$\frac{L_c}{L_m} = 3.$$

3.2. Métodos matemáticos de planificación de puertos.—Los definimos anteriormente como aquellos métodos basados en la elaboración y estudio de modelos matemáticos del sistema portuario. Un modelo no es más que una imi-

tación de la realidad de un sistema. En su elaboración debemos tener presente que es prácticamente imposible tratar a la vez de forma detallada y simultánea, todos los factores en que se pasa cualquier proceso o fenómeno. Hemos de excluir la gran masa de detalles que parecen menos importantes para nuestro problema y concentrarnos en aquellos aspectos estructurales o de base que son realmente fundamentales. Es el caso del plano de una ciudad que contiene los detalles suficientes para permitirnos ir de un punto a otro de la misma. Por lo tanto digamos que un modelo no solo es la imitación de la realidad de un sistema, sino también una simplificación del mismo.

Los modelos matemáticos son construcciones conceptuales que describen las interdependencias y relaciones entre las variables que acompañan a un sistema, así como sus condiciones de contorno. La experimentación sobre el modelo se efectúa mediante un razonamiento lógico; los resultados en cualquier caso han de compararse con el proceso real por aplicación y contraste, cerrando así el ciclo.

Los elementos de un sistema se representan por variables matemáticas y las actividades desarrolladas dentro de él se representan por ecuaciones. Según que las actividades sean de naturaleza determinista o aleatoria los sistemas se denominan deterministas o bien aleatorios, pudiendo ser estos últimos continuos o discretos, según sea la variable de alimentación. Los modelos pueden ser estacionarios o dinámicos; en los primeros cada periodo de tiempo es tratado de igual modo que cualquier periodo de igual duración, mientras que en los dinámicos hay que arrastrar efectos de un periodo temporal sobre los otros siguientes.

Atendiendo a estos conceptos expuestos y teniendo en cuenta que el sistema portuario es de naturaleza aleatoria de variable discreta, modelizable de forma dinámica, dividiremos los métodos matemáticos de planificación de puertos en métodos analíticos y métodos numéricos.

3.2.1. Métodos analíticos. — Consisten, en esencia, en la elaboración de un modelo del proceso portuario, contemplando solamente el tráfico marítimo, la superficie de agua y la línea de atraque. Sobre ese modelo se determinan todas las magnitudes necesarias para tener definido completamente el proceso, siendo estas magnitudes la base del estudio de optimización de costes.

A partir de las expectativas de la tecnología de construcción de buques y de los estudios económicos del tráfico y de la explotación del puerto, se puede definir el porte medio de la flota que se servirá en él. Este tonelaje medio nos define la utilización más racional de los servicios portuarios, que naturalmente deben ser capaces para el buque máximo, determinando de sus dimensiones individuales.

Los datos de partida para efectuar el dimensionamiento del número de atraques para un año horizonte determinado son el tonelaje total de mercancía a mover, el porte medio de la flota visitante y los costes unitarios de estadia de dicho buque y de amortización del atraque estándar.

Cualquier fenómeno de espera está definido por la ley de llegadas y la de servicio.

Es decir, que el primer paso que hay que realizar en el estudio es la determinación de estas dos leyes.

A partir de estas leyes se pueden encontrar los parámetros característicos del proceso.

Para centrar ideas vamos a desarrollar el caso frecuente en la práctica de llegadas según la ley de Poisson y servicio según una ley exponencial.

Consideraremos el puerto como conjunto de dársenas, cada una con un tráfico específico. Una dársena está integrada por un número de puestos de atraque estándar, cuya determinación es el objeto del estudio. La formulación matemática de las leyes anteriormente citadas es:

$$\text{Ley de llegadas } a(\xi) = \frac{\lambda^\xi e^{-\lambda}}{\xi!}$$

$$\text{Ley de servicio } s(\xi) = \mu e^{-\mu \xi}$$

Donde λ es la tasa media de llegadas (número de buques que llegan por unidad de tiempo) y μ es la tasa media de servicio (número de buques servidos por unidad de tiempo).

Es fácil demostrar que la relación entre el tiempo medio de espera de buques y el tiempo medio de ocupación de atraques es:

$$\frac{\bar{W}}{\bar{V}} = \frac{\theta^S}{S \cdot S! \left(1 - \frac{\theta}{S}\right)^2} \cdot \frac{1}{\sum_{n=1}^{S-1} \frac{\theta^n}{n!} + \frac{\theta^S}{S! \left(1 - \frac{\theta}{S}\right)}}$$

Expresión que, como vemos, depende del número de atraques S y del porcentaje de ocupación θ (número de unidades de tiempo, en las que se encuentra algún atraque ocupado durante el período de utilización expresado en tanto por ciento) y que se pueden representar gráficamente como familia de curvas de parámetro S en un sistema cartesiano $\left(\theta, \frac{\bar{W}}{V}\right)$

A partir de la expresión anterior o bien del gráfico que la representa, podemos obtener el tiempo medio de espera de buques, para cada S y cada θ , sin más que multiplicar el valor resultante de la relación $\frac{\bar{W}}{V}$ por el tiempo medio de ocupación, que no es sino $\frac{1}{\mu}$. A partir de este valor de $\bar{W}$ obtenemos el tiempo total

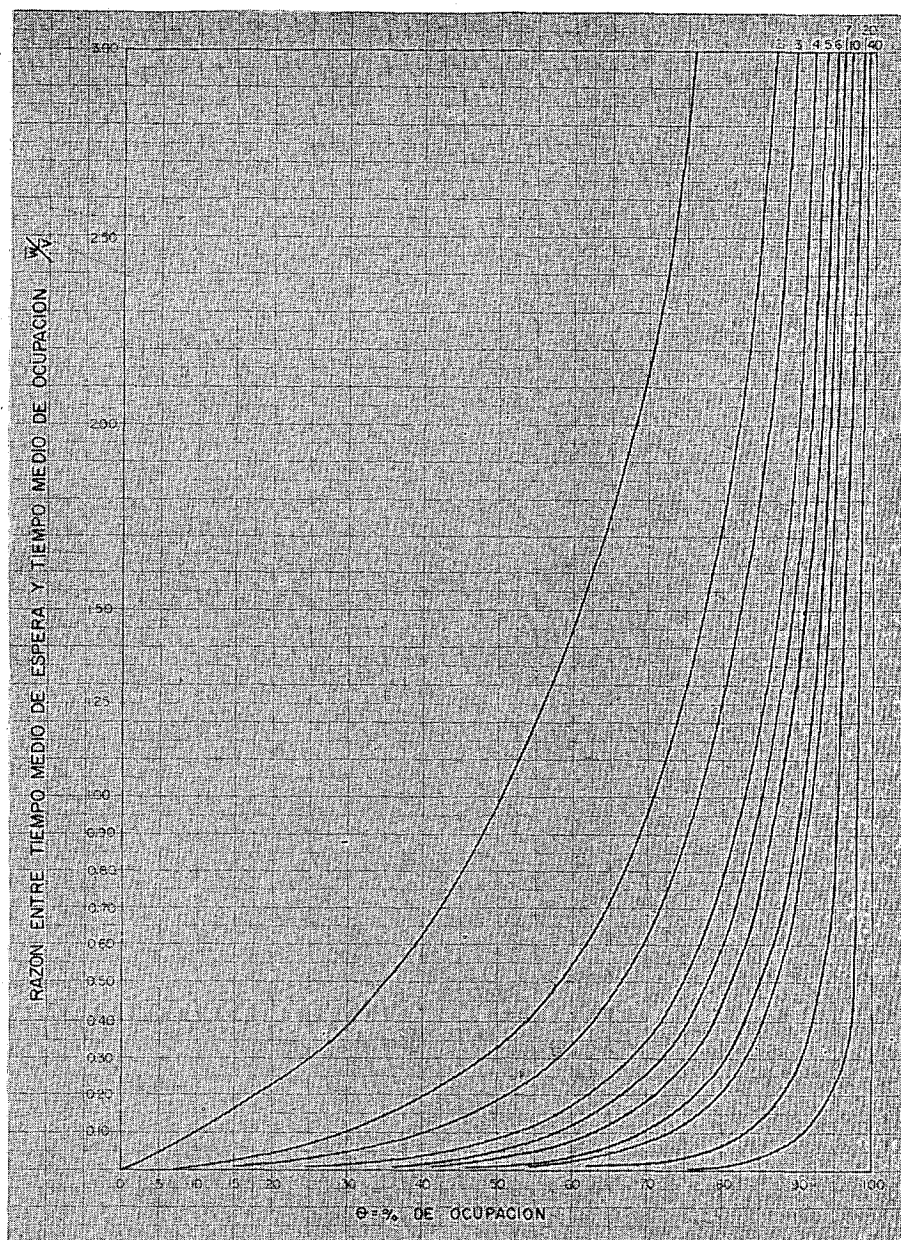


Figura 1.

de estadias sin más que multiplicar por $T \cdot \lambda$, que es el número de buques que llegan durante el período T al puerto. Es decir, que el tiempo total de espera de buques no es otro que el obtenido del gráfico multiplicado por el factor $\frac{T \lambda}{\mu}$.

Por otra parte la expresión del tiempo total de atraque ocioso es:

$$T_{ea} = T S (1 - \theta).$$

Donde T es el período de utilización del atraque estándar y S y θ tienen los significados anteriores.

La aplicación de los costes unitarios a los tiempos determinados anteriormente, nos define la función de costes C .

La mercancía que mueve el puerto durante el período de utilización es:

$$Q = T \cdot S \cdot \theta \cdot R \quad (R = \text{rendimiento de transbordo}).$$

Y en definitiva, para cada valor de S tenemos θ pares de valores Q, C , que tabularemos o representaremos gráficamente, y entre los que existe una correspondencia, de tal forma que para cada tonelaje a mover Q podemos determinar el número de atraques y la ocupación óptimos de operación.

Vemos, pues, que partiendo de la previsión de tráfico de mercancías, podemos llegar a determinar la curva de desarrollo del número de atraques del puerto.

El dimensionamiento de la zona de fondeo es inmediato, ya que el número medio de buques que esperan es:

$$\bar{v} = \lambda \bar{w}.$$

A partir de este valor se procede a dimensionar la superficie de agua del puerto.

3.2.2. Métodos de simulación. — La simulación de sistemas o técnicas de resolución del problema siguiendo la variación en el tiempo de modelos dinámicos de éstos, puede adoptar dos variantes según sean, o se consideren, las variables continuas o discretas. En este último caso la simulación consiste en seguir la evolución del sistema en el transcurso de instantes o intervalos de tiempo en los que únicamente pueden acaecer sucesos.

El estudio de simulación de un sistema de-

terminado se puede descomponer, en líneas generales, en los siguientes estudios parciales:

- Definición del problema.
- Planeamiento del estudio.
- Elaboración de un modelo matemático.
- Elaboración de un programa de ordenador para el modelo.
- Comprobación de la validez del modelo.
- Planeamiento de los experimentos.
- Ejecución de la simulación y análisis de los resultados.

Los dos primeros pasos son necesarios para establecer el problema en sí y los objetivos de la simulación.

La elaboración del modelo lleva por consiguiente la elaboración de la estructura del modelo propiamente dicha y la elección de datos del sistema a suministrar al modelo.

La elaboración del programa es un trabajo perfectamente definido, aunque no por ello resulta de fácil ejecución, siendo a veces necesario llevarlo en paralelo con la elaboración del modelo, para introducir las simplificaciones pertinentes y facilitar la tarea al programador.

La comprobación del modelo se realiza ya con los resultados del ordenador, contrastando los datos reales con las salidas del cálculo numérico.

El planeamiento de los experimentos de simulación es un trabajo importante, ya que en definitiva en él radica la bondad del resultado y la economía del estudio de simulación.

La última fase del estudio es de tipo mecánico y su parte más importante es la interpretación de los resultados, ya que es común a todos los métodos de planificación explicados hasta aquí.

Las partes más relevantes del estudio de simulación son la elaboración del modelo y el planeamiento de los experimentos, por lo que vamos a dar a continuación la sistemática de estas dos partes. Por la peculiaridad del tema es destacable asimismo la elaboración del programa, por lo que daremos también unas ideas generales de los lenguajes empleados y de algunos programas generales.

3.2.2.1. Elaboración del modelo. — Hemos dicho que un modelo matemático es una construcción conceptual que describe las interdependencias y relaciones entre las variables que acompañan a un sistema. El modelo se puede

representar gráficamente mediante un diagrama operacional o de cálculo, que incluye aquellas consideraciones a tener en cuenta, además, en la experimentación con el modelo.

Así, con bloques rectangulares se representarán amplias órdenes de cálculo que se describirán brevemente dentro del bloque sin necesidad de descender a detalladas instrucciones en las que el programador fácilmente descompondrá después.

El test a que se somete el proceso al final de algunos bloques se escribirá dentro de un rombo o de un óvalo, con bifurcaciones hacia los posibles bloques que han de ser procesados a continuación, así como las condiciones para seguir por cada ruta. Generalmente, la bifurcación se hace por dos rutas que se corresponden con las respuestas Sí o No a una pregunta establecida.

Suele distinguirse entre variables e índices; estos últimos son típicamente contadores o marcas que ayudan a especificar el curso de los cálculos: las variables y los resultados se alojan en registros. Finalmente digamos que en determinados bloques se produce la alimentación del modelo, introduciendo dentro de él los datos o variables aleatorias exógenas que le han de ir dando vida durante la experimentación.

Para alimentar un modelo aleatorio hay que extraer valores al azar de las distribuciones estadísticas en él contenidas.

Hay dos tipos principales de distribuciones, de las cuales vamos a requerir muestras: de variable continua (con función de densidad de probabilidad; por ejemplo, la distribución exponencial) y de variable discreta (por ejemplo, la distribución de Poisson).

Por limitaciones prácticas, o de conveniencia, las variables continuas vienen medidas en cantidades discretas de una cierta unidad, y la función de densidad de probabilidad viene sustituida por la escalonada de un histograma.

El muestreo de la distribución de frecuencias del histograma no presenta diferencias con el caso de las variables discretas.

Es práctica casi general que sea independiente cada valor muestral de los precedentes, característica básica del llamado muestreo aleatorio simple.

El problema del muestreo de una distribución estadística, se reduce al de muestreo de una distribución uniforme, pues ésta se trans-

forma en la distribución de la variable que nos interesa, a través de la inversa de la curva acumulativa.

Un número al azar según una distribución equiprobable en el intervalo 0-100, se transforma en un número elegido al azar según la distribución deseada en el intervalo $a-b$.

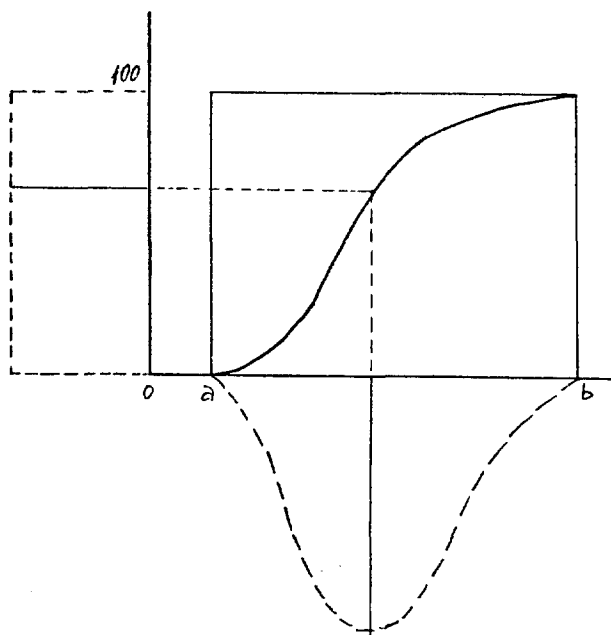


Figura 2.

Se necesita, por tanto, dos cosas: una fuente aleatoria y la disponibilidad de la curva acumulativa en su forma inversa.

La fuente aleatoria más común es la formada por números aleatorios contenidos en tablas construidas por medio de máquinas aleatorias, o resultados de operaciones matemáticas que generan largas sucesiones de los llamados números pseudoaleatorios.

La idea de usar tablas de números aleatorios fue introducida por Tippett cuando estudió la distribución del recorrido de una muestra extraída de una población normal.

Las tablas de Tippett eran de 10.400 dígitos aleatorios sacados del dígito último de unas tablas del censo.

M. G. Kendall & Babington-Smith elaboraron una tabla de 100.000 dígitos usando un generador mecánico.

Fisher & Yates elaboraron una tabla más pequeña de 15.000 dígitos con las cifras decimales (15a a 19a) de unas tablas de logaritmos británicas.

La Rand Corporation de América elaboró 1.000.000 de dígitos aleatorios usando un mecanismo electrónico.

Ante la dificultad de almacenar un gran volumen de números aleatorios en la memoria de un ordenador, y ante la conveniencia, muchas veces, de que sea reproducible una sucesión de números aleatorios, se utilizan procedimientos deterministas que generan sucesiones reproducibles de números aleatorios que se llaman pseudoaleatorios, pues la misma reproducibilidad es contraria a la aleatoriedad.

Entre los procedimientos usados están:

1. La técnica de los medios cuadrados, introducida por Von Neuman. Sea X_0 un número de P dígitos que se eleva al cuadrado y de los $2P$ dígitos resultantes se toman los P centrales para formar el número X_1 . El número X_1 es a su vez elevado al cuadrado, repitiendo el proceso. La sucesión se repite cuando aparece algún valor previo. Algunos valores pueden conducir a un término cero, siendo l la longitud de la parte cíclica.

2. El método de los medios productos. A partir de dos valores iniciales, X_1 y X_2 se multiplican tomando los dígitos centrales como X_3 . El proceso se repite con X_2 y X_3 .

3. El método de las congruencias de Lehmar:

$$\begin{aligned} X_0 & \\ X_1 &= K x_0 \bmod m \\ X_2 &= K x_1 \bmod m \\ X_{n+1} &= K x_n \bmod m. \end{aligned}$$

m y K son inicialmente enteros arbitrarios, pero la longitud del ciclo depende de la elección de estos valores.

En cuanto a la posibilidad de disponer de la curva acumulativa en su forma inversa, se consideran varios casos:

1.º Cuando sea posible efectuar analíticamente la inversión de la función de distribución acumulativa.

Por ejemplo, la exponencial negativa:

Función de densidad de probabilidad:

$$P(x) = e^{-x}; \quad 0 \leq x \leq +\infty.$$

Función de distribución acumulativa:

$$P(x) = 1 - e^{-x}.$$

Inversa:

$$x = -\log_e (1 - P).$$

Por tanto, para disponer de muestras de variables distribuidas exponencialmente, hemos de calcular el negativo de los logaritmos de números aleatorios distribuidos uniformemente en el intervalo 0-1.

2.º Cuando no sea posible efectuar analíticamente la inversión de la función de distribución acumulativa, pero es perfectamente conocida esta función de distribución. Se calculan valores de esta función para un gran número de valores de x ; el x correspondiente a un P es el resultado de una interpolación.

3.º Cuando sea posible encontrar una aproximación de la distribución acumulativa, por medio de una fórmula algebraica. Se interpola con los valores generados por la aproximación.

4.º Cuando sea posible proceder a la aproximación con la inversa de la distribución acumulada. Así se evita la interpolación inversa del caso tercero.

5.º El método de los rechazos cuando es fácil conocer la función de densidad, pero difícil evaluar su integral o la inversa. Si la función de densidad es acotada, $f(x) \leq M$ para $a \leq x \leq b$ se eligen puntos al azar en el rectángulo de base (a, b) y altura M , rechazando aquellos de ordenada superior a $f(x)$.

3.2.2.2. Programas de cálculo electrónico.

Como ya sabemos, los sistemas discretos se caracterizan porque sus variaciones se producen discontinuamente a lo largo del tiempo, a cada uno de estos cambios es a lo que hemos denominado suceso, que ocurre en un instante determinado, y puede alterar la magnitud de alguna propiedad del sistema, crearla o destruirla, o dar comienzo o fin a una actividad determinada. Ya que la simulación consiste en el seguimiento de los cambios que se producen en el sistema, el trabajo de simular sistemas discretos, requiere la elaboración de un programa con el que sea posible seguir la secuencia de sucesos. Y se pueden emplear dos procedimientos: seguir la producción de sucesos o bien la producción de actividades. En cualquiera de los dos casos la ejecución de la simulación es idéntica. Existen dos formas de operación para contabilizar las variaciones o sucesos del sistema a lo largo del tiempo: la primera se basa en contabilizar el tiempo entre sucesos o actividad-

des, generándolo directamente; la segunda consiste en ir avanzando el tiempo en períodos discretos, y contabilizar el número de períodos entre sucesos o actividades.

Existen varios lenguajes de programación para la simulación de sistemas discretos, siendo los dos más introducidos el GPSS (General Purpose System Simulation) y el SIMSCRIPT, el primero sigue la secuencia de sucesos, mientras que el segundo la producción de actividades.

En líneas generales y sea cual fuera el lenguaje de programación, la elaboración del programa comprende las siguientes fases:

Generación del modelo, o imagen del sistema, que consiste en crear una serie de números representativos del estado del mismo; las actividades desarrolladas en el sistema por los elementos que llegan a él, se reflejan mediante rutinas incluidas en el modelo.

La segunda fase consiste en programar el algoritmo de la simulación, es decir, el procedimiento por el que se lleva a cabo ésta. Generalmente este algoritmo radica en la repetición de los siguientes cinco pasos:

1. Encontrar el siguiente suceso.
2. Seleccionar la actividad correspondiente.
3. Comprobar si el suceso se puede alcanzar.
4. Cambiar la imagen del sistema.
5. Contabilizar resultados.

Por último, hay que programar la salida de datos o resultado de la simulación.

Todo esto se recoge gráficamente en el diagrama de la figura 3.

3.2.2.3. Planeamiento de experimentos.

Vamos a dar en este apartado la normativa general para realizar la simulación de un proceso determinado de variable estocástica.

Hemos realizado ya el modelo y el programa de ordenador para determinar mediante cálculo numérico los parámetros definitorios del proceso. Por lo tanto, sólo nos resta determinar cuántas vueltas hay que realizar a la simulación para poder aceptar los resultados de ésta.

En primer lugar resaltemos que es conveniente hacer desaparecer las condiciones iniciales del sistema, con influencia en la primera vuelta de la simulación y en los resultados finales si no son necesarias muchas vueltas. La eliminación de estas condiciones iniciales se logra simplemente comenzando la simulación y parando después de transcurrido un período de tiempo. Las condiciones iniciales de la simulación se toman como las que tiene el sistema en ese instante.

Volviendo de nuevo a nuestro problema de determinar las vueltas que tenemos que dar a la simulación, como el resultado de ésta es determinar un parámetro medio del sistema obtenido como media de los parámetros medios de cada vuelta, estamos en el caso de que, dado una muestra k de una población aleatoria de sucesos, debemos aceptar una media de esta muestra con un determinado nivel de confianza.

Es decir, que repetida la simulación k veces tenemos una muestra $r_1 r_2 \dots r_k$ a partir de la cual estimamos la media:

$$\bar{r}_k = \frac{1}{k} (r_1 + r_2 + \dots + r_k),$$

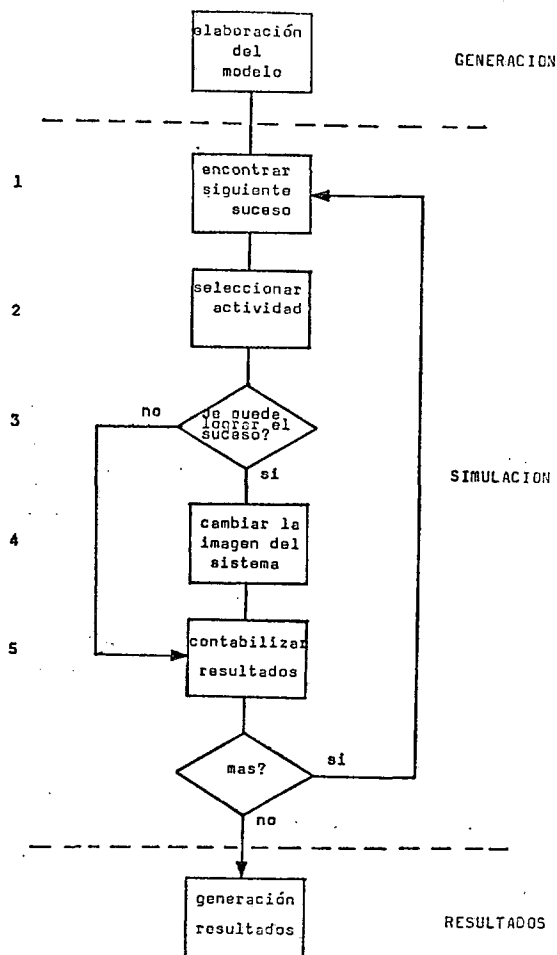


Figura 3.

y la varianza:

$$s_k = \frac{1}{k-1} \sum_{i=1}^k (r_i - \bar{r}_k)^2.$$

Se demuestra que la muestra constituida por los r_i sigue una ley de distribución de probabilidad *T-Student* con $(k-1)$ grados de libertad. Para cada nivel de confianza existe, pues, un intervalo, que llamaremos de confianza también, tal que la probabilidad de que la media muestral esté comprendida en él es igual al nivel de confianza tomado.

Es decir, que si es $t\%$ la probabilidad *T-Student* para un nivel de confianza dado y $(k-1)$ grados de libertad, el intervalo de confianza viene dado por $\bar{r} \pm t \frac{s}{\sqrt{k}}$. En definitiva,

para saber qué tamaño debemos dar a la muestra (número de vueltas de la simulación), aceptaremos una amplitud del intervalo de confianza y un nivel de confianza y procederemos de la siguiente forma:

Daremos k vueltas a la simulación, calculando al finalizar cada una de ellas $\bar{r}$ y s , entonces para el nivel de confianza adoptado y $k-1$ grados de libertad tomaremos de unas tablas de probabilidad *T-Student* el valor correspondiente de ésta, calculando $t \cdot \frac{s}{\sqrt{k}}$ y comparando

este valor con el radio del intervalo de confianza adoptado. Si es menor, quiere decir que el valor hallado de $\bar{r}$ tiene para ese intervalo un nivel de confianza igual al tomado, es decir, que de cada 100 veces que se diera el fenómeno, el valor de $\bar{r}$ estaría dentro del intervalo tomado un número de veces igual al porcentaje del nivel de confianza

Si, por el contrario, $t \cdot \frac{s}{\sqrt{k}} > d$ (radio del intervalo = semiamplitud), debemos continuar la simulación hasta que se invierta la desigualdad.

Normalmente se aceptan niveles de confianza del 90 al 95 por 100 y amplitudes del intervalo de confianza del orden de $0,1 \bar{r}$.

3.2.2.4. El caso general de un puerto comercial.—Para una dimensión dada del conjunto de medios y servicios portuarios, la simulación determina el tiempo de permanencia de

los modos de transporte en el sistema y los tiempos medios de espera de éstos y de los servicios, que, como hemos visto, son los parámetros que caracterizan al sistema.

Es decir, que el estudio de simulación de un puerto comienza estableciendo los servicios del mismo y los objetivos que se persiguen. Conociendo ya los servicios y su dimensión inicial, estamos en condiciones de realizar la simulación del puerto, que abordaremos en cinco etapas.

En primer lugar, necesitamos las estadísticas de tráfico existentes para establecer la proyección futura de éste, que es la siguiente fase del estudio, y cuyo resultado es dar una tabla frecuencial para los distintos modos de transporte. Realmente es la fase siguiente, "generación de tráfico", el resultado de las dos anteriores y principal dato de alimentación de la simulación.



Figura 4.

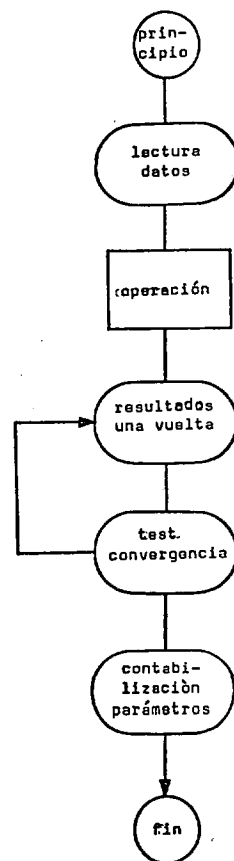


Figura 5.

En esta fase obtenemos las tablas cronológicas de llegadas de buques, camiones y trenes a puerto. A continuación comienza la fase de simulación propiamente dicha, en la que se sigue la operación para cada cargamento transbordado y que conduce a la definición de los parámetros del puerto, con los que se realizará el estudio de optimización de costes. Este proceso se repetirá según se fijó inicialmente, haciendo variar la dimensión del servicio en estudio, para determinar de esta forma su óptimo.

El estudio se representa según el diagrama de la figura 4.

De las cinco fases de las que se compone el estudio son fundamentales la generación dinámica del tráfico y la simulación de la operación,

ya que son la base de estimación de los parámetros estadísticos que nos definen el sistema y el estudio.

El modelo debe prever el control del número de vueltas de la simulación, que, tal como hemos visto anteriormente, se puede realizar con un *test T-Student*.

Es decir, generado el tráfico y simulada la operación durante el período tipo de tiempo, se efectúa un *test* de convergencia que autodefine si hay que seguir la simulación o no, procediendo en este último caso a contabilizar los parámetros y llegando a establecer los resultados de la simulación.

Así que el diagrama lógico a establecer tras de cada simulación es el de la figura 5.