

## ANEXO 1

### MODELO DE SIMULACIÓN PORTUARIA PARA VERACRUZ

Un modelo de simulación portuaria es la representación del comportamiento de un sistema portuario cuyos componentes principales son: llegada de los barcos, ingreso de barcos a los sitios, maniobras de carga/descarga, maniobras de porteo e ingreso/salida de las cargas a los almacenes y salida de éstos últimos a los destinos al interior del país.

La programación de tal comportamiento requiere conocer de manera detallada las características del sistema seleccionando, al menos, un año que refleje la operación de dicho sistema, para reproducir su comportamiento. Posteriormente, mediante un instrumento computacional elaborado de manera expresa para el proceso, es posible reflejar el comportamiento del sistema y proyectarlo.

Para considerar como válida la información que proporciona un simulador, debe calibrarse tomando en cuenta que refleje el comportamiento efectivo del sistema en un periodo específico. Ello indica que los resultados de una predicción tiene validez, en la medida que para el año de calibración, no se presenten discrepancias entre los resultados reales y simulados.

Para el proyecto en estudio se elaboró un modelo computacional de simulación portuaria por el CEPEP y la empresa especializada en servicios de computo aplicado SOFTTEK. Este modelo computacional se programó en lenguaje *visual-basic*, explotando las ventajas de una hoja de cálculo en el manejo de la información de entrada y salida del modelo.

Como se trata de un proyecto de modificación de la capacidad de descarga de las naves, con el modelo se busca cuantificar y valorar el STAT por tipo de nave carga en las situaciones sin y con proyecto y los beneficios por ahorro en STAT. Dichos resultados se obtienen realizando un número adecuado de corridas y se presenta como una distribución normal con sus respectivos valor esperado medio y desviación estándar.

#### A.1.1. Descripción de los componentes y variables del modelo

Los componentes y variables que describen el sistema portuario susceptibles de ser modelados son:

- patrones de llegada de naves
- determinación de los tipos de nave carga que arriban al puerto
- demanda por servicios portuarios por tipo de nave carga
- asignación a los sitios de carga/descarga de naves

- operaciones de carga y descarga en sitios y salida a los almacenes

Adicionalmente, se puede simular como se desalojan los almacenes en función de la infraestructura disponible para tal operación y la capacidad de transporte de salida (furgones de ferrocarril, camiones, etc.).

En el proyecto se considera la capacidad y velocidad de salida de almacén como una restricción al modelo de simulación, razón por lo que no se comentará.

*a) Patrones de llegadas de naves al puerto de Veracruz*

Corresponden a una *distribución de probabilidades de Poisson*<sup>5</sup> entre el tiempo de llegada, considerando los diferentes niveles de llegadas de barcos en el futuro. Para calcular el tiempo entre llegadas se toma en cuenta la siguiente ecuación:

$$T = -TM \log X$$

Donde:

TM: es el tiempo medio entre llegadas determinado como:

$$TM = \text{naves arribadas/horas disponibles de puerto}$$

X: es un número aleatorio entre 0 y 1.

- 
5. La *variable aleatoria* en este caso es el *tiempo de llegada de las naves-carga* que ocurre a lo largo de un tiempo o espacio continuo y por ello llamada del tipo Poisson (iniciador de su estudio) y que indica el número de acontecimientos de un evento específico dentro de un tiempo o espacio especificado. El proceso Poisson es el acontecimiento de una serie de eventos de un tipo dado, en forma aleatoria, en un tiempo o espacio tal que: (1) el número de acontecimientos es igual a cualquier entero entre cero e infinito, (2) el número de acontecimientos dentro de una unidad de tiempo o espacio es independiente del de cualquier otra unidad (que no se traslape), y (3) la probabilidad de acontecimientos es la misma en todas esas unidades. Los eventos del tipo Poisson mas conocidos son las llegadas de aviones a un aeropuerto, el arribo de naves a un puerto, de camiones a las terminales, de clientes a una fila de espera a un banco. La particularidad en las llegadas es que no deben ser regulares para que el evento sea totalmente aleatorio. (Kohler Heinz, Estadística para negocios y economía. Editorial CECSA, primera edición . México 1996, Págs. 223-224).

Para simular las llegadas se puede optar por fijar una de las variables y simular la otra. Para determinar TM se tomó la media del tonelaje transportado por tipo de nave-carga con base en los arribos del periodo 1993 a agosto de 1996 y los días del año de operación del puerto y se obtienen la naves arribadas como sigue:

$$\text{Naves arribadas} = \text{Tonelaje medio por tipo de nave} / \text{Días puerto disponible}$$

La demanda de importaciones y oferta de exportaciones de un país es estacional, ya que obedece a los patrones de producción de los productos internamente y los déficit/superávits registrados tomando en cuenta la demanda y oferta internas. Por ejemplo, la demanda de granos para consumo humano es constante, mientras que la oferta interna se presenta en periodos cortos, por lo que en los periodos de déficit se presenta la demanda por importaciones.

Por tal motivo, se tiene que identificar los componentes estacionales del flujo de arribo de naves para reflejarlo en la tasa de llegada de las mismas. En el caso particular del puerto de Veracruz fueron identificados 4 periodos de demanda, asignándose con base en información del volumen operado en 1993-1996 que reportan un porcentaje de carga movilizado (Ver cuadro A.1.1y A.1.2).

La opciones de patrones de llegadas simulados es un árbol que relaciona tipo de nave carga y estacionalidad, obteniéndose una distribución de llegadas del tipo Poisson por tipo de nave carga cada periodo de demanda de importaciones/oferta de exportaciones.

#### *b) Determinación del tipos de nave carga*

A partir de información de las cargas transportadas por las diferentes empresas navieras que arriban a un puerto se determinan los tipos llamados "nave-carga". Estos tipos son predecibles en cuanto que se especializan en alguno o algunos productos; por ejemplo, barcos graneleros, de aceites, etc. Las variables distintivas de cada tipo de nave carga son:

- tonelaje transportado
- capacidad de la nave-carga
- eslora o longitud de la nave
- caldo de la nave

Las 2 primeras variables son *aleatorias* y se comportan de acuerdo a una *distribución normal de probabilidades*<sup>6</sup> de ocurrencia de un valor específico. Las dos siguientes son consistentes con la capacidad de la nave carga determinada probabilísticamente.

Para el caso del puerto de Veracruz se definieron 28 tipos de nave carga relevantes para el proyecto (ver cuadros A.1.2 y A.1.3); a partir del arribo de naves del periodo de 1993 a agosto de 1996 se determinó la media y la desviación estándar para la determinación aleatoria de los tipos de nave-carga (ver cuadro A.1.4).

#### *c) Demanda de servicios portuarios por tipo de nave-carga*

Para determinar la demanda de servicios portuarios es necesario contar con:

- la proyección de la demanda por importaciones de cada producto
- la forma de transporte de las cargas
- la determinación de los tipos de nave carga
- asignación de las cargas a los tipos de nave-carga
- el número de naves carga y su tasa media de llegadas

En lo que respecta al primer punto, la proyección no depende de la operación del puerto. Está en función del análisis de los factores determinantes de la demanda por importaciones que se relacionan con las condiciones económicas del país. Para el resto de los puntos se tiene información de la historia de la operación del puerto. El cuadro A.1.5 contiene la información de la proyección de la demanda por importaciones de productos y las exportaciones para el caso de Melaza.

#### *d) Asignación a los sitios de carga/descarga por nave-carga*

Previo a la asignación de sitios a los barcos arribados, se hace un recuento de la disponibilidad de sitios de atraque identificados en cuanto a sus características físicas (profundidad, longitud, especialización o vocación de

---

6. Una *distribución normal de probabilidad* es una función de densidad de probabilidad que es: (1) un pico sobre la media, mediana y moda de la variable aleatoria, todas iguales entre sí; (2) perfectamente simétrica alrededor de este valor central en pico y, por lo tanto, llamada de “forma de campana”; y (3) caracterizada por colas que se extienden en ambas direcciones desde el centro, y se aproximan pero nunca tocan el eje horizontal, lo que implica una probabilidad positiva de hallar valores de la variable aleatoria en cualquier punto entre menos infinito e infinito (Kohler Heinz, Estadística para negocios y economía. Editorial CECSA, primera edición. México 1996, pág. 250).

sitio) y de operación referidas a los parámetros de rendimientos de carga/descarga por tipo de nave-carga.

Posteriormente, tomando en cuenta los tipos de nave-carga arribados se identifican las posiciones de atraque o sitios en los muelles que permiten operar el barco de acuerdo a su eslora y calado.

En los cuadros A.1.6 al A.1.9 se presentan las características de los sitios relevantes para el proyecto.

#### A.1.2 Proceso de operación del simulador

La operación del simulador portuario elaborado se puede sintetizar como sigue:

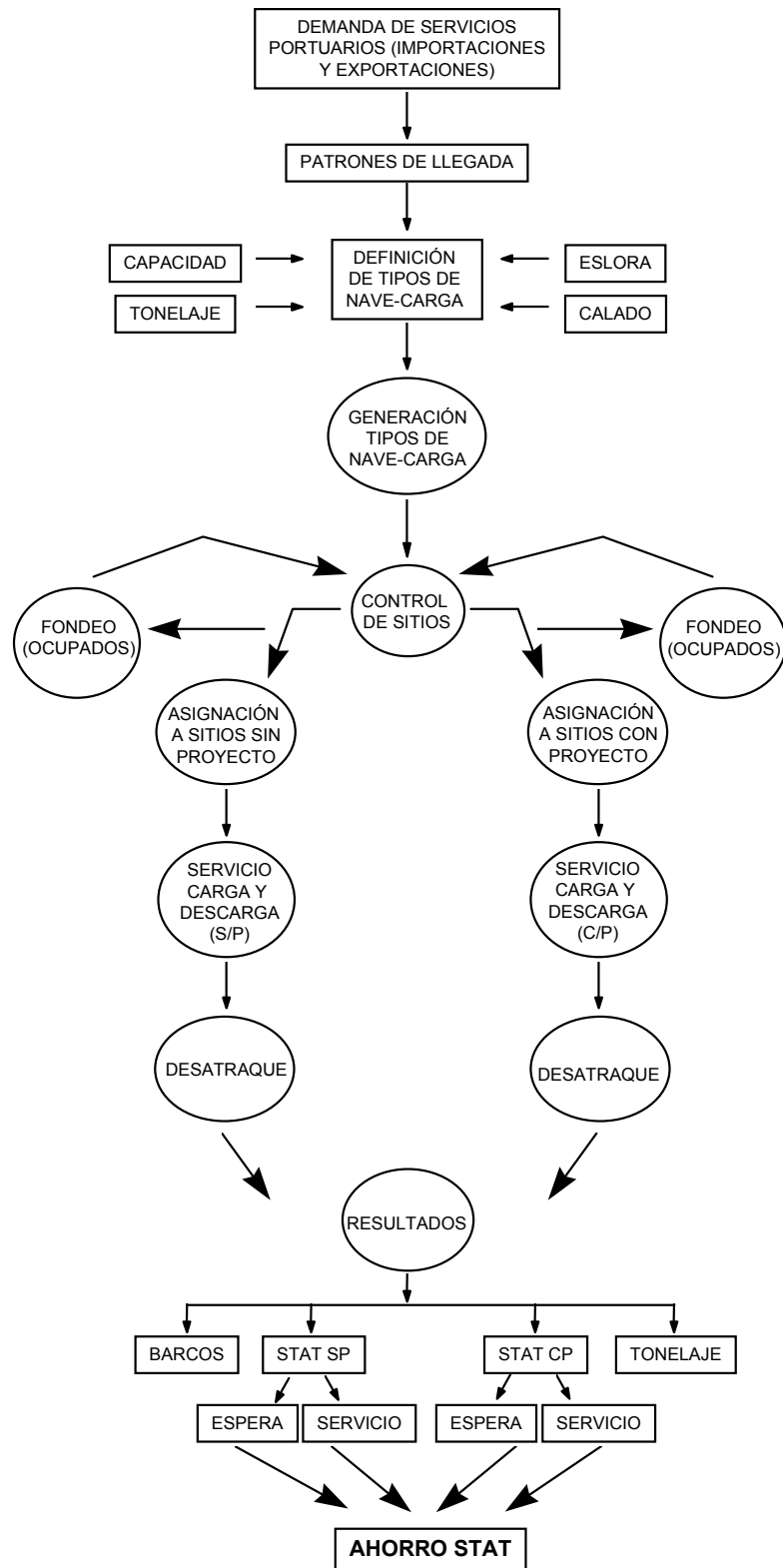
- Datos de entrada al modelo:
  - Demanda por servicios portuarios
  - Identificación de sitios de atraque
  - Definición de tipo de naves carga
  - Estacionalidad de la llegada de nave-carga
- Operaciones internas del modelo
  - Generación de barcos tipo
  - Control de disponibilidad de sitios
  - Asignación de barcos a los sitios
  - Operaciones de carga/descarga
  - Identificación de almacenes asociados a los sitios de carga/descarga
- Obtención de resultados por simulación portuaria
  - Barcos arribados por trimestre por tipo de nave carga en la situación sin y con proyecto
  - Toneladas operadas por trimestre por tipo de nave carga
  - Medición del tiempo de espera de naves-carga cuando no hay sitios disponibles
  - Medición del tiempo de operación en sitio por tipo de nave-carga
  - Valoración del STAT para las situaciones con y sin proyecto
  - Determinación del ahorro en el STAT

Para obtener los resultados del proyecto se requiere “correr” un número adecuado de simulaciones (por lo menos 1,500) con el objeto de obtener

distribuciones normales del STAT sin y con proyecto y los ahorros en STAT. Una vez elaboradas las “corridas”, el simulador entrega lo siguiente:

- Valor esperado o medio del STAT sin proyecto
- Desviación estándar del STAT sin proyecto
- Gráfica de la distribución del STAT sin proyecto por tipo de nave-carga y total
- Valor esperado o medio del STAT con proyecto
- Desviación estándar del STAT con proyecto
- Gráfica de la distribución del STAT con proyecto por tipo de nave-carga y total
- Valor esperado o medio del Ahorro en STAT
- Desviación estándar del Ahorro en STAT
- Gráfica de la distribución del Ahorro en STAT total
- Toneladas promedio manejadas en las simulaciones
- Barcos arribados promedio por trimestre y total en las simulaciones

En el diagrama siguiente se presenta la estructura operacional del modelo de simulación elaborado.



**Esquema de operación del modelo de simulación portuaria**