

MEDICION DE LA CAPACIDAD PORTUARIA

Alejandro Pattillo B.

Enrique Morales M.

Escuela de Ingeniería de Transporte

Universidad Católica de Valparaíso

Casilla 2059 - Valparaíso

RESUMEN

Se compara los resultados en la estimación de la capacidad portuaria por medio de la relación tonelaje movilizado-tasa de utilización-tiempo de espera, empleando el análisis matemático basado en la teoría de colas y utilizando un modelo de simulación en lenguaje SLAM.

El caso que se analiza corresponde a un puerto pequeño con tres puestos de atraque, sin preferencia asignada, donde se atienden naves convencionales con carga general fraccionada, de tráfico internacional y cabotaje, y graneleros secos. El ejemplo es típico de algunos puertos chilenos.

Como ejercicio, se dividió la línea de atraque en dos frentes, para demostrar, mediante el modelo, el efecto en los resultados, ya que en el análisis matemático el concepto "frente de atraque" no tiene significación, pues considera solamente el número de puestos de atraque, cualquiera sea su disposición.

El análisis se hizo partiendo de un año base y proyectando a dos horizontes de 5 y 10 años.

Los resultados demuestran:

- a) Aunque el tiempo total requerido para la transferencia es prácticamente igual en ambos métodos, la tasa de ocupación es menor y más cercana a la realidad en el modelo de simulación.
- b) La diferencia en los tiempos de espera es mucho más acentuada.
- c) El análisis matemático es pesimista y determina la necesidad de ampliaciones con mucha anticipación, lo que puede generar una subutilización de infraestructura, afectando su rentabilidad.

1. INTRODUCCION

El puerto ideal desde el punto de vista del transportista marítimo es aquel que le puede ofrecer un puesto de atraque al momento de recalcar. Desde el punto de vista del puerto, es aquel que mantiene todos sus puestos de atraque ocupados por naves en operaciones de transferencia de carga.

Ambas condiciones resultan desventajosas para el costo del transporte. La primera, porque el carácter aleatorio de las recaladas de las naves obligaría al puerto a hacer inversiones innecesarias para mantener infraestructura subutilizada y la segunda, porque al no haber puestos disponibles para las naves que solicitan atraque, éstas permanecerían en espera o serían redestinadas a otro puerto, originando mayores costos de transporte.

Debido a la complejidad técnica de la infraestructura portuaria y al tiempo que se requiere para su construcción, la relación entre los puestos disponibles y los puestos utilizados es un problema que debe resolverse con bastante anticipación, basándose en los pronósticos de demanda portuaria, los que dan al comportamiento futuro del puerto un carácter probabilístico.

La relación entre la tasa de utilización de los puestos y el tiempo de servicio de las naves es muy compleja. Si a ello se agrega la poca confiabilidad de las proyecciones de demanda portuaria, producida por múltiples factores exógenos, es fácil comprender que el planificador portuario se encuentra siempre en una situación de relativa incertidumbre.

Asumiendo que las proyecciones de carga son confiables, el comportamiento futuro del puerto se puede estimar mediante análisis matemático o utilizando un modelo de simulación.

2. ANALISIS MATEMATICO

El fundamento del sistema lo constituyen la distribución estadística para la llegada de las naves y para los tiempos de servicio, relacionadas a la teoría de colas.

Las soluciones analíticas generales de la teoría de colas existen solamente en dos casos. En ambos el régimen de recaladas (número de naves por unidad de tiempo) corresponde a una distribución de Poisson en tanto que los tiempos de servicios (T_s) corresponden a una distribución exponencial (Erlang) o son constantes (Morse, 1965).

Los estudios de UNCTAD (Manual de Desarrollo Portuario) han confirmado que la recalada de naves de carga general fraccionada se puede representar con cierta exactitud por una distribución de Poisson. De información también recopilada por UNCTAD se concluyó que los tiempos de servicio se representan con cierta propiedad por una distribución Erlang 2.

En el caso de tiempo de servicio constante, que se presenta generalmente en la transferencia de graneles, la solución incluye infinitas se-

ries que sólo pueden ser evaluadas por computador y la relación T_s y tiempo de espera (T_e) es bastante menor que cuando se trata de tiempo de servicio equivalente a una distribución exponencial (Agerschou y Korsgaard, 1983). El tiempo de servicio constante es típico de graneleros y tanqueros cuyas recaladas son generalmente programadas no aleatorias, de manera que el caso llegadas aleatorias-tiempo de servicio constante, como análisis matemático no tiene aplicación práctica.

La fórmula de Erlang expresa la probabilidad que el tiempo de servicio exceda un determinado valor t .

$$P_o(t) = e^{-Kut} \sum_{n=0}^{K-1} \frac{(Kut)^n}{n!} \quad (1)$$

Las numerosas observaciones realizadas en varios puertos, durante varios años por UNCTAD, definieron a $K=2$ como el número de Erlang de la distribución teórica que mejor se ajusta a la distribución observada de los tiempos de servicio.

Aunque el sistema $M/E_2/n$ es muy complicado, basándose en una aproximación sugerida por Page (Page, 1972) la UNCTAD ha preparado una tabla que representa la relación entre el tiempo de espera y el tiempo de servicio en función de la tasa de utilización y el número de sitios.

El procedimiento para determinar matemáticamente el funcionamiento de un puerto ante un pronóstico de demanda portuaria requiere la siguiente información previa:

- Pronóstico de demanda de transferencia portuaria (carga y descarga), clasificada en rubros más significativos. El sistema supone que la carga o embarque, es una operación a continuación de la descarga, aunque en la práctica ocurre a veces que se realizan operaciones simultáneas.
- El número de puestos de atraque.
- Los rendimientos horarios por nave para cada rubro de carga (rendimientos promedios por cuadrilla x promedio de escotillas trabajadas). Es importante que estos rendimientos sean promedios reales, referidos al tiempo de atraque y no al tiempo efectivamente trabajado.
- El tonelaje promedio histórico por rubro que se transfiere en cada recalada.

El cálculo es muy simple:

$$\text{Número de Buques } (N_B) = \sum_{i=1}^N \frac{\text{Tonealda Total por rubro } i}{\text{Tonealda promedio rubro } i \text{ por buque}} \quad (2)$$

Rendimiento promedio = Promedio armónico de rendimiento por rubro.

$$\text{Tiempo de Servicio} = \frac{\text{Tonelaje promedio por buque}}{\text{Rendimiento promedio}} + 2 \quad (3)$$

$$\text{TU} = \frac{\text{Número buques} \times \text{Tiempo Servicio}}{\text{Número Sitios} \times \text{Tiempo Disponible}}$$

$$\text{Te} = c \text{Ts}$$

$$c = \text{Coeficiente de la tabla M/E}_2/\text{n}$$

Observaciones

- a) El número de buques no distingue diferencias de esloras, ya que cada buque atraca a cada puesto indiferentemente.
- b) El número de buques se determina en función del rendimiento promedio. En la realidad los rendimientos son exponenciales. Considerando constante el rendimiento de la cuadrilla, los rendimientos dependen del número de escotillas que se trabaja en cada caso.
- c) En la práctica se observa que el Te obtenido es mayor que el real. Esto se debe a que la Autoridad Portuaria puede acomodar los buques aprovechando mejor la línea de atraque.

3. MODELO DE SIMULACION

Muchas de las debilidades del análisis matemático de la ocupación de los puestos de atraque se pueden obviar mediante el uso de un modelo de simulación, pero a su vez éste requiere de proyecciones confiables del tráfico y de los rendimientos futuros en la manipulación de la carga.

Adicionalmente un modelo de simulación debe validarse, para lo cual se necesita además considerable información histórica del funcionamiento del puerto.

Una de las mayores ventajas del modelo es que sustituye el concepto de puesto de atraque por el concepto de frente de atraque. Este atributo es particularmente importante cuando por razones de obsolescencia dimensional, muelles o malecones diseñados para un determinado número de sitios resultan inadecuados debido al aumento en las esloras totales de las naves. Un ejemplo de esta situación es el malecón de los puestos 4 y 5 de Valparaíso cuya longitud es 365m. La longitud original de los puestos era de 182,5 m., adecuados para naves de hasta 160 m. de eslora total. En la actualidad el puesto 4 está destinado a buques portacontenedores de 200 m. de eslora total que requieren 220 m. de atraque, por lo tanto si se insiste en dividir ese frente en puestos, para los efectos del cálculo de tasa de utilización, habría que considerarlo como un sólo puesto lo cual desvirtuaría el cálculo y además habría que separarlo del conjunto por tratarse de un sitio de asignación especial.

En el concepto de frente de atraque, el modelo asigna naves a los espacios de atraque disponibles de acuerdo con la eslora de la nave que arriba, restándola de la longitud del frente.

Además, el modelo puede introducir, para cada tramo de esloras, naves de esloras intermedias y adicionalmente considerar una variación exponencial de rendimientos donde el análisis matemático trabaja con promedios.

4. EJERCICIO

Para comparar los resultados de ambos métodos se ha elegido un frente de atraque de tres sitios, típico de algunos puertos chilenos, cuyo funcionamiento registró en el año 0 los siguientes resultados:

| | | |
|--------------------------|---------------------------|----------------------------|
| - Número de puestos | : | 3 |
| - Tiempo disponible | : | 365 días |
| - Jornada diaria | : | 3 turnos x 7,5 = 22,5 hrs. |
| - Tonelaje transferido : | Carga general fraccionada | = 501.900 t. |
| | Graneles secos | = 442.114 t. |
| | Cabotaje | = 27.990 t. |
| | Total transferido | = 972.004 t. |

El frente de atraque no tiene puestos pre-asignados. Las naves graneleras atracan en cualquier sitio y realizan faenas de carga y descarga. Debido a la variedad de productos a granel que se transfieren, las operaciones se hacen con equipos móviles de distinto tipo: descarga de granos con equipos neumáticos y embarque de varios productos con correas transportadoras. Se asume que los rendimientos de estas transferencias son iguales.

El puerto tuvo en el año 0 un registro histórico de 210 naves en total, cuya clasificación por tipo y rangos de eslora fue la siguiente:

TABLA N° 1
Número de Naves según tipo y eslora

| Esloras en m. Tipo | 76-100 | 101-125 | 126-150 | 151-175 | 176-200 |
|-----------------------|--------|---------|---------|---------|---------|
| Carga fracc. | 4 | 12 | 35 | 100 | 20 |
| Graneles | - | - | 6 | 7 | 7 |
| Cabotaje | 4 | 14 | 1 | - | - |

Los tonelajes medios de transferencia por rango de eslora y tipo de nave registrados fueron los siguientes:

TABLA N° 2
Tonelajes medios por rango de eslora

| Esloras en m. Tipo | 76-100 | 101-125 | 126-150 | 151-175 | 176-200 |
|-----------------------|--------|---------|---------|---------|---------|
| Carga facc. | 1.300 | 1.850 | 2.500 | 3.100 | 3.850 |
| Graneles | - | - | 17.100 | 21.350 | 27.150 |
| Cabotaje | 915 | 1.620 | 1.650 | - | - |

El tonelaje total transferido en cada rango:

TABLA N° 3
Tonelaje total por tipo de nave

| Esloras en m. Tipo | 76-100 | 101-125 | 126-150 | 151-175 | 176-200 | TOTALES |
|-----------------------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Carga fracc. | 5.200 | 22.200 | 87.500 | 310.000 | 77.000 | 501.700 |
| Graneles | - | - | 102.600 | 149.450 | 190.064 | 442.114 |
| Cabotaje | 3.660 | 22.680 | 1.650 | - | - | 27.990 |
| | | | | | | 972.004 |
| | | | | | | ===== |

Dicha transferencia se realizó con los siguientes rendimientos, expresados en Tons/buque-hora, en cada rango de esloras.

TABLA N° 4
Rendimientos Transferencia

| Esloras en m. Tipo | 76-100 | 101-125 | 126-150 | 151-175 | 176-200 |
|-----------------------|--------|---------|---------|---------|---------|
| Carga fracc. | 50 | 50 | 75 | 80 | 87 |
| Granel | - | - | 280 | 280 | 280 |
| Cabotaje | 50 | 50 | 75 | - | - |

Los cuales determinaron un tiempo medio de servicio para cada nave en cada rango de esloras expresado en horas:

TABLA N° 5
Tiempos Medios de Servicio por Nave

| Esloras en m. Tipo | 76-100 | 101-125 | 126-150 | 151-175 | 176-200 |
|-----------------------|--------|---------|---------|---------|---------|
| Carga fracc. | 26,0 | 37,0 | 33,3 | 38,8 | 44,25 |
| Graneles | - | - | 61,1 | 76,25 | 97,0 |
| Cabotaje | 18,3 | 32,4 | 22,0 | - | - |

4.1 Análisis Matemático

De la información anterior se obtiene:

Número de buques : 210
 Toneladas Transferidas : 972,004
 Toneladas/Nave : 4.628,6
 Rendimiento Promedio : 112
 Tiempo de Servicio : 44,0 hrs.
 Tiempo de Utilización : $44,0 + 2 = 46,0$
 Tasa Utilización : 36,7%

Haciendo uso de las tablas propuestas por UNCTAD para tres sitios y 37% tasa de utilización se determina $c = 0,05$.

$$\text{Tiempo de Espera} = 46,0 \times 0,05 = 2,3 \text{ hrs.}$$

Se asumió que las proyecciones de demanda y otros factores de comportamiento portuario variarían para el año 5, en la siguiente forma:

- Tonelaje a transferir: Carga fraccionada : + 25%
 Graneles : + 20%
 Cabotaje : + 10%
- Clasificación por rangos de eslora: Se mantienen las proporciones en los distintos tipos de buques.
- Tonelajes medios por rango de eslora y tipo de buque:
 Aumentan en 8% en los buques de comercio exterior y en 5% en los de cabotaje.

Para el año 10 se estimaron las mismas variaciones.

Actualizando la información base para el año 5 y para el año 10, se obtiene:

- Año 5

Número de buques : 240
Toneladas a transferir : 1.205.666
Toneladas/Nave : 5.023,6
Rendimiento Promedio : 113,6
Tiempo de Servicio : 47,2
Tiempo de Utilización : 47,2 + 2 = 49,2

TU = 45%

$$\text{Tiempo de Espera} = 49,2 \times 0,08 = 3,93 \text{ hrs.}$$

- Año 10

Número de buques : 282
Toneladas a transferir : 1.467.076
Toneladas/Nave : 5.202,4
Rendimiento Promedio : 112,1
Tiempo de Servicio : 49,5
Tiempo de Utilización : 49,5 + 2 = 51,5

TU = 55%

$$\text{Tiempo de Espera} = 51,5 \times 0,15 = 7,72 \text{ hrs.}$$

4.2 Modelo de Simulación

El modelo de simulación está hecho en el lenguaje SLAM (Simulation Language for Alternative Model).

El objetivo fundamental del modelo es, dada la situación de número y tipos de naves señalada, analizar la variación en los tiempos de espera de las naves y la utilización de la infraestructura de atraque cuando esta última se divide en uno o dos frentes de atraque.

En la lógica del modelo se distinguen cuatro módulos que son: uno en el cual se generan los diferentes tipos de naves y se asignan sus esloras y tiempos de servicio; un segundo en el cual las naves son asignadas a los frentes de atraque; y un tercer y cuarto módulo en los cuales se calculan los tiempos de espera, y tiempos de servicio y en puerto respectivamente.

De acuerdo al objetivo señalado, el segundo módulo de asignación de naves a los frentes, es el que es necesario modificar cuando la longitud de atraque se divide en frentes.

La malla del modelo realizada con símbolos del lenguaje SLAM, corresponde a la situación de dos frentes de atraque. (Figura 1)

Para la operación del modelo, las variables exógenas, es decir, aquellas manejadas por el usuario, corresponden a: distribución de tiempo entre arribos, esloras y tiempos de servicio de los tres tipos de naves consideradas, y la longitud de los frentes de atraque.

En la ejecución del algoritmo de simulación, después de generada una nave y asignados sus valores de eslora y tiempo de servicio, el modelo "revisa" si de acuerdo a la eslora señalada y la longitud de atraque disponible en ese momento, la nave puede hacer uso de algún frente. De ser posible, la nave atraca y realiza una "actividad" cuya duración corresponde al tiempo de servicio asignado anteriormente. De lo contrario debe esperar hasta que aumente la longitud de atraque disponible.

Las salidas generadas por el modelo, de acuerdo al formato estándar del lenguaje SLAM, son:

- Tiempo promedio de espera por tipo de nave y promedio general.
- Tiempo promedio de servicio por tipo de nave y promedio general.
- Tiempo promedio en puerto por tipo de nave y promedio general.
- Horas de uso de cada frente de atraque.
- Porcentaje de utilización de cada frente de atraque.

En las Tablas N° 6 y N° 7 se presentan resultados comparativos para el Análisis Matemático (AM) y Modelo de Simulación (MS).

5. COMPARACION DE RESULTADOS

TABLA N° 6

Caso I : Un Frente de Atraque de 600 m.

| AÑO | Horas Totales | | Tasa Utilización | | Ts | | Te | |
|-----|---------------|--------|------------------|------|------|------|------|------|
| | M.S. | A.M. | M.S. | A.M. | M.S. | A.M. | M.S. | A.M. |
| 0 | 9.180 | 9.240 | 27,3 | 36,7 | 43,7 | 44,0 | 0,49 | 2,30 |
| 5 | 11.014 | 11.328 | 32,9 | 45,0 | 45,8 | 47,2 | 1,51 | 3,93 |
| 10 | 13.316 | 13.959 | 39,9 | 55,0 | 47,3 | 49,5 | 5,9 | 7,72 |

TABLA N° 7

Caso II: Dos Frentes. Frente 1:440 m. Frente 2:220 m.

| AÑO | Horas Totales | | | Tasa Utilización | | | Ts | Te |
|-----|---------------|----------|--------|------------------|----------|---------|-------|------|
| | Frente 1 | Frente 2 | Total | Frente 1 | Frente 2 | Promed. | | |
| 0 | 7.518 | 1.662 | 9.180 | 36,13 | 15,85 | 29,37 | 43,68 | 0,71 |
| 5 | 8.735,2 | 2.278,8 | 11.014 | 41,87 | 22,74 | 35,96 | 45,84 | 1,99 |
| 10 | 10.131,36 | 3.184,32 | 13.316 | 48,63 | 30,52 | 42,59 | 47,28 | 7,01 |

6. COMENTARIOS

- a) Las horas totales de utilización determinadas en ambos métodos coinciden ya que se originan de los mismos factores. Sin embargo, el modelo de simulación aprovecha la longitud de atraque en forma intensa y se acerca más a la realidad de un puerto manejado eficientemente por un buen administrador. Por ejemplo, si hay un puesto de atraque (220 m.) disponible y recalcan sucesivamente dos naves de eslora menor de 100 m., tanto el modelo de simulación como el buen administrador atracarán ambas naves. El análisis matemático asignará solo una y si no hay otro puesto disponible, la segunda nave deberá esperar. Suponiendo que haya otro puesto disponible el análisis matemático lo utilizará; entonces, para transferir un mismo tonelaje el modelo de simulación y también el buen administrador utilizarán un solo sitio durante el mismo tiempo que el análisis matemático utilizará dos; de ahí que para transferir el tonelaje total de un puerto modelo de simulación requerirá un menor uso de la línea de atraque, el buen administrador algo más y el análisis matemático decididamente una tasa mayor que la realidad de un buen puerto.

- b) Si la tasa de utilización es menor, entonces el tiempo medio de espera será menor y el puerto podrá hacer frente a un crecimiento de la demanda por mayor tiempo, hasta que el tiempo medio de espera no sea aceptable.
- c) Al estar el puerto constituido por dos frentes (Caso II) el primero de dos puestos y el segundo de uno, los resultados del análisis matemático no se alteran. En cambio tanto el modelo de simulación como el buen administrador no obtienen tan buenos resultados, porque sus posibilidades de aprovechar la longitud de atraque, haciendo juego con las esloras si éstas recalcan en forma favorable, se disminuyen, lo cual se puede apreciar en el cuadro anterior.
- d) De lo anterior se deduce que, si existe suficiente registro histórico para validar un modelo de simulación y si la proyección de tráfico es confiable, el modelo es el método más eficaz para pronosticar el funcionamiento futuro del puerto y su utilización dependerá de la importancia del problema y del tiempo disponible para analizarlo.

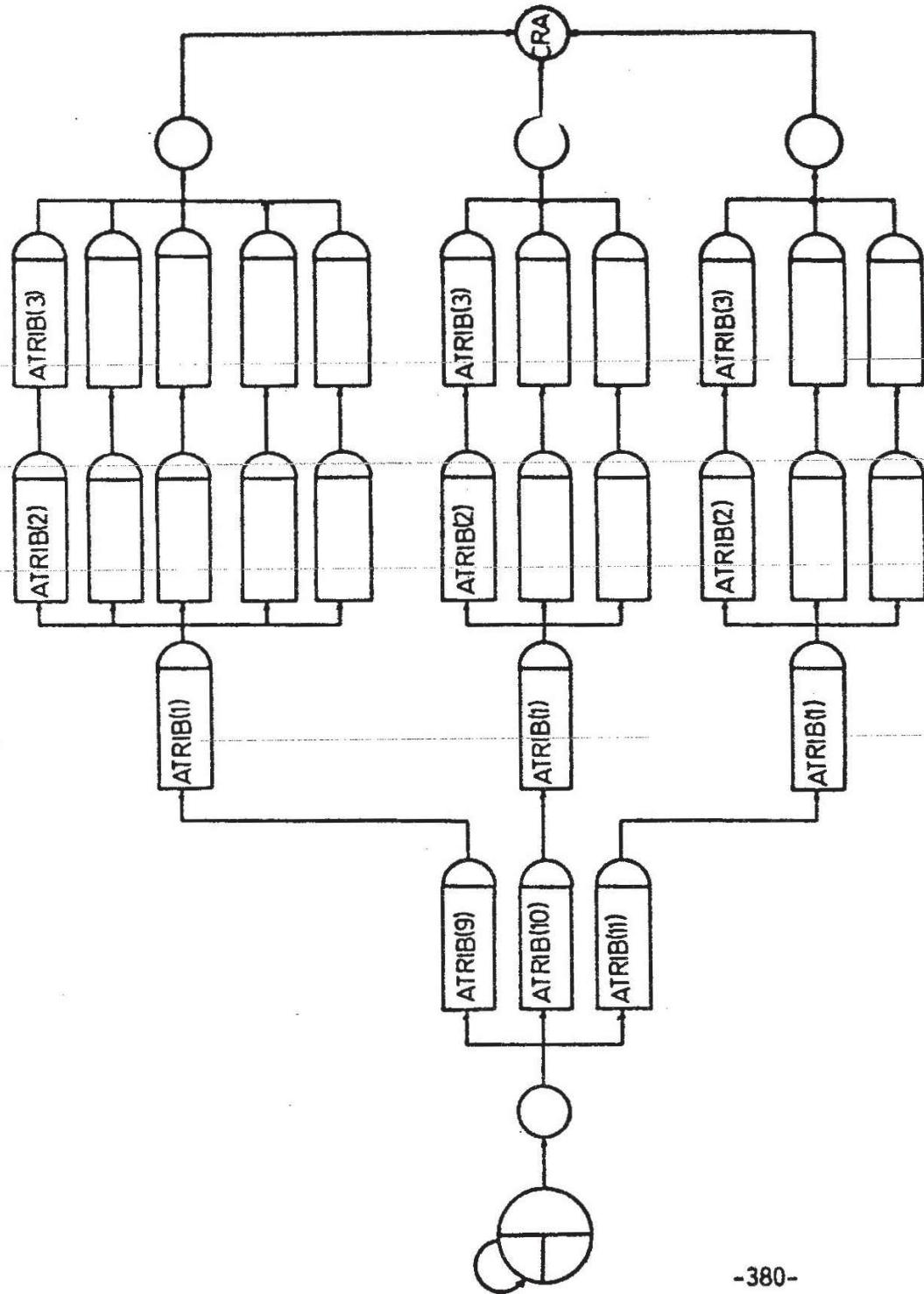
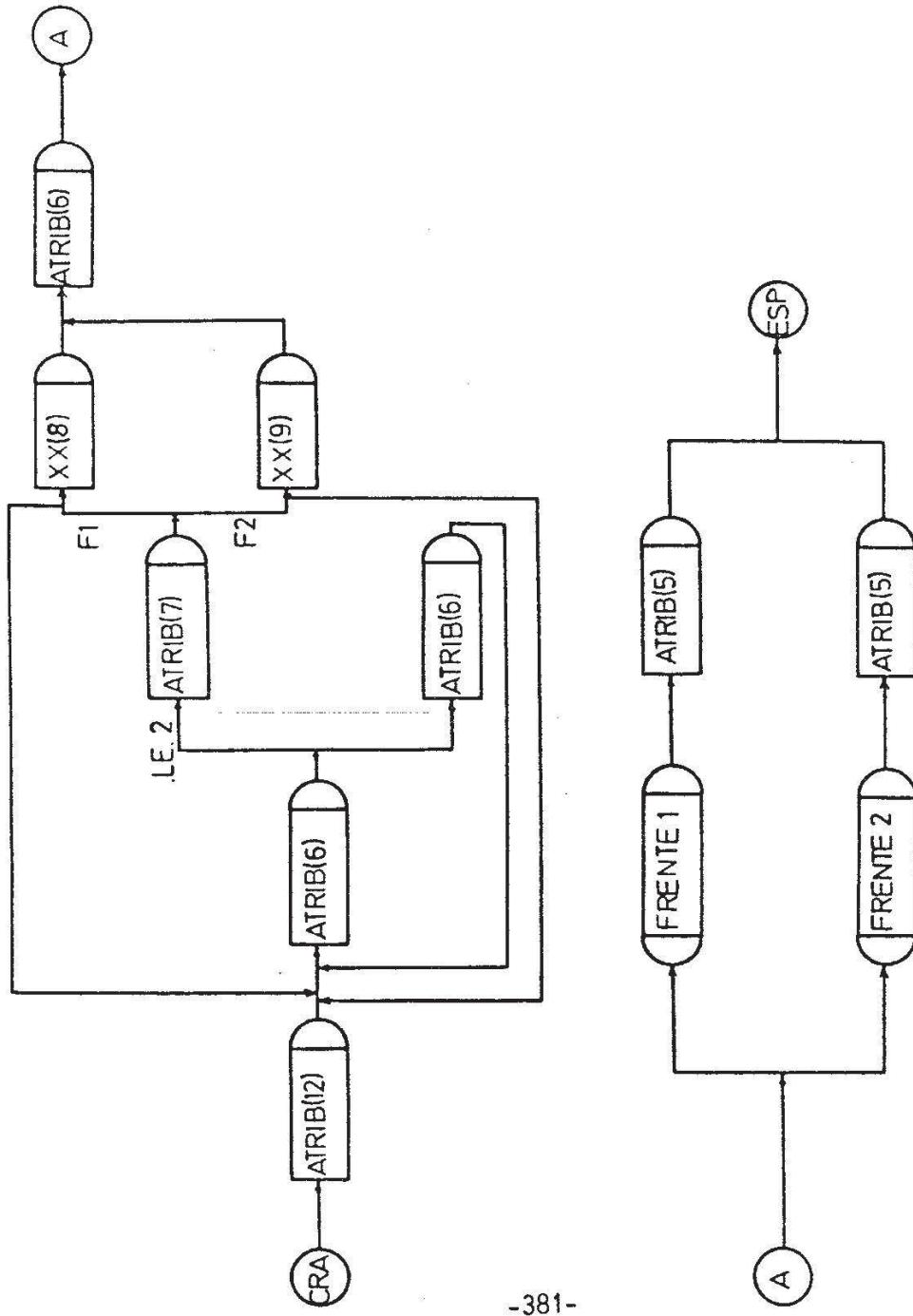
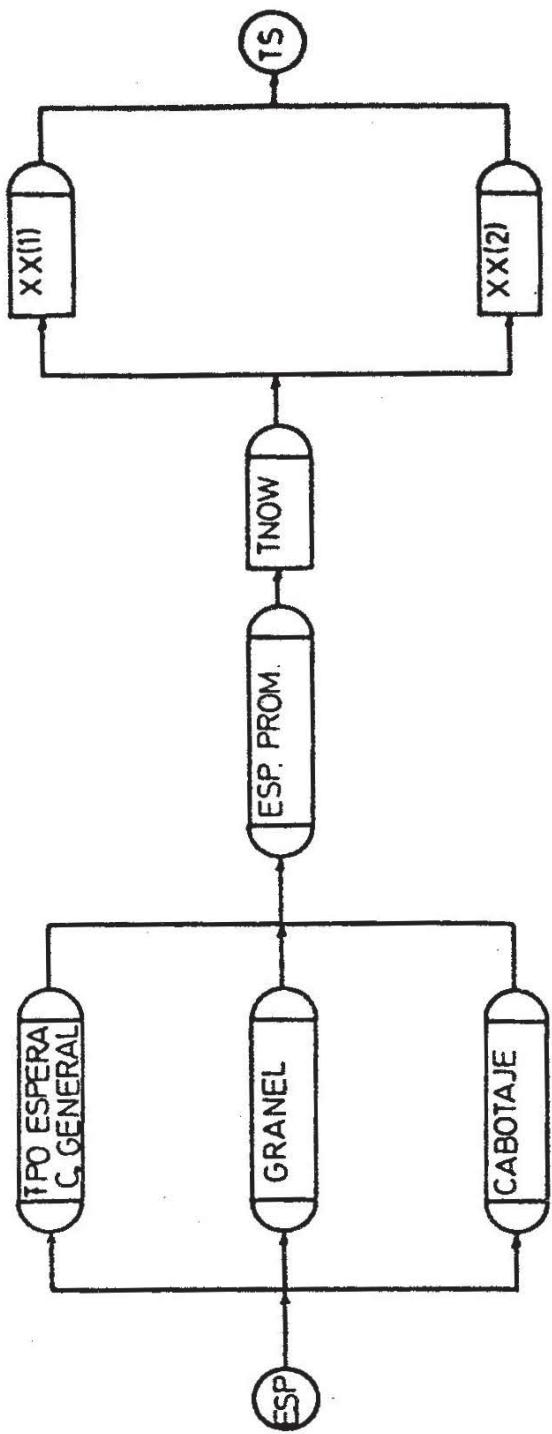


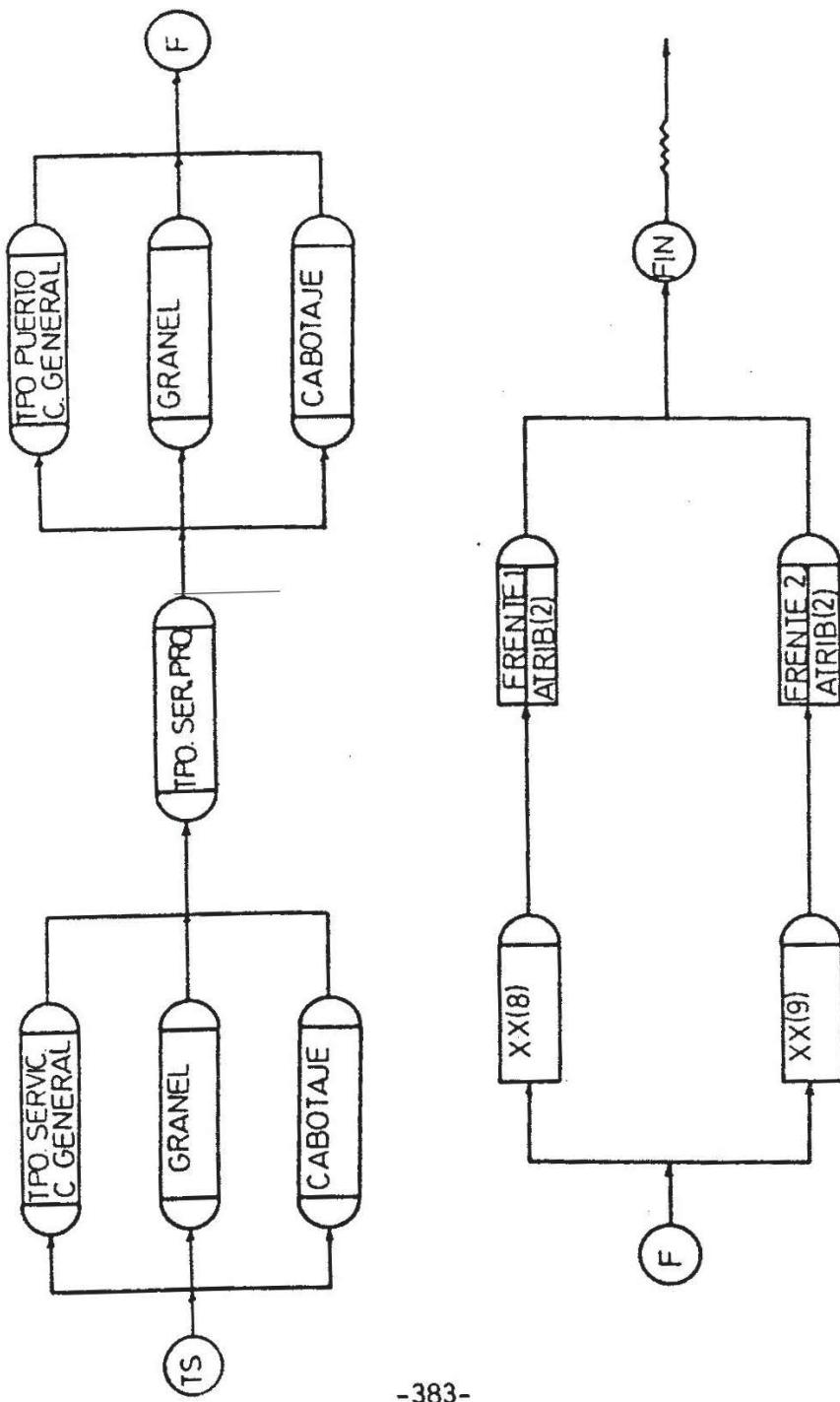
FIGURA 1 : PRIMER MODULO : Genera tipos de naves y asigna eslora y tiempo de servicio



SEGUNDO MÓDULO Asigna naves a frentes de ataque



TERCER MÓDULO Cálculo tiempo espera por tipo de nave



CUARTO MODULO Calculo tiempos de servicio y en puerto