

**ESCUELA DE GRADUADOS DE INGENIERIA PORTUARIA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE BUENOS AIRES**

Buenos Aires, ARGENTINA

Junio 12 de 2003

**LOS MODELOS DE SIMULACION APLICADOS A
LA PLANIFICACION PORTUARIA**

**- ESTUDIO DE CASO: EL SISTEMA PORTUARIO
DE BAHIA BLANCA, ARGENTINA-**

Ing. Carlos E. GINES *

1 - INTRODUCCION

Dentro del proceso de planificación y desarrollo de los puertos en general y de las terminales en particular, la determinación del número de sitios de atraque posee una importancia vital.

Las técnicas existentes hoy en día para resolver este problema se basan en métodos que van de lo más simple a lo más sofisticado, justificando el uso de cada una de ellas la complejidad del problema que se esté abordando.

Los métodos mencionados pueden ser puntualizadas conforme el siguiente menú:

1. **Métodos empíricos:** se emplean a nivel de anteproyecto y tienen en cuenta parámetros de productividad promedio de muelles ubicados en distintos lugares del mundo, por ejemplo; para carga general full palletizada 900 ton/barco-día; contenedores de ultramar 450 T.E.U's/barco-día; productos forestales 1.500 ton/barco-día; aceros y metales 2.000 ton/barco-día; etc.
2. **Métodos basados en la Teoría de las Colas de Espera:** se emplean para sistemas portuarios o terminales de configuración simple con un nivel de tráfico intenso.
3. **Métodos basados en los Modelos de Simulación:** se emplean para sistemas portuarios o terminales de compleja configuración con un nivel de tráfico intenso.

En esta presentación se tratará específicamente el tercer método, esto es la aplicación de los Modelos de Simulación para el estudio y análisis del comportamiento de los puertos y/o terminales.

2 - LOS MODELOS DE SIMULACION

Las simulaciones son empleadas para realizar estudios de partes coherentes del mundo real, denominadas "sistemas", por medio de la experimentación con modelos que representan esos sistemas.

(*) Jefe de Area Planificación y Desarrollo del Consorcio de Gestión del Puerto de Bahía Blanca.
Profesor Asociado, Cátedra "Puertos y Vías Navegables", Depto. de Ingeniería, Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca, ARGENTINA.

Con estas simulaciones se puede obtener un mayor conocimiento e interpretación de los fenómenos que se manifiestan en los sistemas, mejorando el control de los mismos y obteniendo sensibles beneficios en su operación.

La complejidad de un sistema está relacionada con el grado de paralelismo de los eventos que en él se manifiestan. Considerando que el ser humano no puede controlar la conducta de más de cuatro componentes de un sistema que se encuentre llevando a cabo operaciones en forma simultánea, existen dos formas de efectuar el seguimiento de los mismos:

- A través del denominado método del "Perro Guardián".
- A través de los modelos de simulación.

El método del "Perro Guardián" permite realizar cambios relativamente pequeños y en forma cronológica a las variables del sistema, los cuales deberían ser sumamente simples, de manera tal que permitieran al "Perro Guardián" alertar las consecuencias motivadas por dichos cambios.

El segundo método se basa en principios científicos mucho más sólidos. En realidad toda la ciencia se basa en modelos de la realidad, a través de los cuales somos capaces de determinar las consecuencias de los cambios. Sin esta herramienta deberíamos observar al sistema desde afuera, colectando unos pocos datos sueltos (generalmente no relevantes para nuestro interés) como respuesta de su funcionamiento.

2.1 - El Sistema Portuario

Desde el punto de vista de las simulaciones de sistemas de servicios mediante el uso de computadoras, se puede definir al "sistema portuario" como un grupo de componentes o entidades, interdependientes e interactuantes, vinculados entre sí, con el fin de llevar a cabo una función específica.

Esta definición se aleja bastante de aquellas tradicionalmente utilizadas para precisar el concepto de "puerto", aunque si se analiza en detalle, se podría llegar a concluir que se ajusta en buena medida al mecanismo de funcionamiento de una terminal o grupo de terminales portuarias. Por ejemplo:

- Los "*buques*" pueden ser identificados como los COMPONENTES ó ENTIDADES del sistema, caracterizados por su comportamiento eminentemente azaroso (randomness), tal como se manifiesta, por ejemplo, a través de la estructura de sus arribos - en general de tipo irregular - al puerto.
- Las actividades de dichos "*buques*" (COMPONENTES ó ENTIDADES) pueden ocasionar fuertes impactos en el resto de las embarcaciones u otros usuarios presentes en el sistema, verificándose de esta manera, un alto grado de relación entre sus actividades (INTERACCIONES).

Según el grado de complejidad del comportamiento de los COMPONENTES ó ENTIDADES actuantes, como así también del número de sus INTERACCIONES, diferentes serán las herramientas que se podrán destinar a resolver los problemas de interpretación del funcionamiento del sistema.

Los sistemas simples (pocas clases de componentes y funcionamiento sencillo) pueden analizarse mediante la ayuda de programas elaborados directamente con las conocidas planillas electrónicas de cálculo (Excel, Lotus, etc.).

A medida que la complejidad del sistema se incrementa será necesario acudir a herramientas más evolucionadas, tal el caso de las simulaciones Monte Carlo, la programación lineal, los modelos matemáticos y los modelos de simulación.

Un modelo de simulación es la representación de un sistema real, en nuestro caso el sistema portuario, sobre el cual puede experimentarse, con el objeto de interpretar su comportamiento ante los cambios en su estructura o entorno.

Antiguamente, los modelos de simulación eran relativamente simples, limitándose su grado de complejidad a la habilidad de los programadores para llevar adelante operaciones que se incrementaban fuertemente a medida que crecía el número de componentes o entidades actuantes en el sistema. A su vez, si cada uno de estos componentes o entidades generaba una cantidad importante de interacciones, entonces la situación se tornaba rápidamente inmanejable, abortando cualquier intento de simular sistemas mucho más complejos.

Con la aparición de las computadoras personales, este inconveniente se fue superando, dada la posibilidad que los procesadores brindan, no sólo de realizar un elevado número de operaciones en fracciones de segundo, sino también -con una adecuada programación- de manejar un elevado número de interacciones, resultando esto, en la generación de modelos mucho más confiables, potentes y económicos de experimentar.

Por estas razones, los modelos de simulación actuales pueden representar sistemas de elevada complejidad y de comportamiento dinámico, sin mayores inconvenientes.

2.2 - Lenguajes utilizados en la confección de los modelos de simulación

Los modelos deben ser estructurados de manera tal, que los mismos puedan ser interpretados por las herramientas de proceso utilizadas, esto es, las computadoras. Inicialmente, los modelos de simulación fueron escritos en lenguajes de programación de tipo "*multipropósito*", siendo el más común el reconocido FORTRAN. Si bien estos lenguajes permitían desarrollar modelos de cierta complejidad, el esfuerzo y la habilidad requerida de los potenciales modeladores, hacía que éstos se desalentaran rápidamente.

Posteriormente, y con el objeto de simplificar la tarea de los modeladores, surgen, en la década del '60, los llamados "lenguajes de simulación", como el SIMSCRIPT y el GPSS. Estas herramientas, a pesar de ofrecer comandos específicos para manejar la lógica de las colas, el nacimiento y desaparición de los distintos componentes o entidades, sus características y la forma de prestar servicios en los distintos puestos de trabajo, y otros, requerían experimentados modeladores y abundante tiempo de elaboración, si se deseaba desarrollar modelos de cierta complejidad.

Con el fin de reducir estos inconvenientes, los lenguajes continuaron con su evolución, apareciendo en el mercado, softwares de programación más específicos, los que en realidad, eran optimizaciones de los lenguajes tradicionales de simulación. Entre los más difundidos se pueden citar los siguientes: SIMAN, SLAM y PROSIM.

A medida que los beneficios de la simulación se fueron expandiendo en el campo de la ingeniería de los sistemas de servicio, comenzaron a aparecer los denominados "paquetes de simulación o simuladores", especialmente diseñados para construir modelos de determinados sistemas, en forma más expeditiva.

Con estos paquetes, es posible seleccionar, desde un menú de actividades específicas ya diseñadas, las que más se adapten al problema en particular que quiera analizarse. Si bien esto resulta más sencillo, comparado con la programación tradicional, el problema radica en que son demasiado rígidos como para ser aplicados a cualquier sistema, en especial si este posee una lógica de funcionamiento demasiado compleja. Pueden citarse, como aplicaciones dirigidas a sistemas de proceso, los paquetes SIMFACTORY y XCELL.

Los desarrollos subsiguientes estuvieron dirigidos a la integración de la flexibilidad, aportada por los lenguajes específicos, y la facilidad de uso, incorporada por los paquetes de simulación. Estos nuevos softwares de simulación han incrementado sustancialmente el rango de sistemas que pueden ser analizados mediante esta metodología. WITNESS y PROMODEL, podrían ser citados como ejemplos representativos de este tipo de simuladores, también denominados "*de cuarta generación*".

Estas nuevas herramientas han reducido notablemente el esfuerzo requerido para desarrollar un modelo, permitiendo al usuario tomar ventaja del entorno gráfico del sistema operativo WINDOWS de Microsoft, bajo el cual funcionan, por lo que no es necesario contar con una gran experiencia previa para incursionar en tareas de modelación.

Su sencilla lógica de programación, así como su capacidad para asignar una gran variedad de atributos a los componentes del sistema e incorporar rutinas externas, a lo que se debe sumar la importante evolución en el desarrollo de las animaciones gráficas, han resultado de gran utilidad, no sólo en el campo de la interpretación del funcionamiento de los sistemas, sino también en la etapa de los procesos de verificación y validación del modelo.

2.3 - Estructura de un Modelo de Simulación

Sería prácticamente impensado, por ejemplo, tratar de construir un edificio sin una serie de planos o escribir un libro sin un esquema previo de su contenido. De igual manera, el diseñador de un modelo de cierta complejidad, no iniciaría la confección del mismo escribiendo directamente las instrucciones en su computadora, sino que, previamente, transitaría una serie de pasos lógicos, desarrollados con el fin de asumir una mayor comprensión del funcionamiento general del sistema a estudiar. Dicha secuencia, como así también la interacción entre los citados pasos, pueden observarse en la Figura N° 1.

3 ESTUDIO DE CASO – EL SISTEMA PORTUARIO DE BAHIA BLANCA, ARGENTINA

Dentro del marco de los denominados Proyectos para Grupos de Investigación (PGI) existentes en el ámbito de la Universidad Nacional del Sur y contando con un puerto de las características del de Bahía Blanca en la zona de aldea, se llevó adelante un proyecto orientado a demostrar la factibilidad de aplicar la teoría de los modelos de simulación a un sistema de servicios de tipo real.

Para ello, se contó con la inestimable colaboración del ente que conduce al complejo portuario -el Consorcio de Gestión del Puerto de Bahía Blanca- el que aportó los datos de base necesarios para proceder con el proyecto.

A los efectos de tomar conocimiento de la dimensión del complejo portuario de Bahía Blanca, se describen a continuación, las instalaciones y características físicas más importantes del mismo.

3.1 - El Puerto de Bahía Blanca

El puerto de Bahía Blanca comprende un conjunto de instalaciones diseminadas a lo largo de 25 Km. sobre la costa norte del estuario de Bahía Blanca (Figuras N° 2 y N° 3).

Su vía de acceso está constituida por un canal de 190 m. de ancho de solera y 97 Km. de extensión, el que permite la navegación de buques de hasta 45' (13.71 m.) de calado. El mismo cuenta con un moderno sistema de balizamiento, el que posibilita dicha navegación durante las 24 horas.

Ingresando desde el Océano Atlántico hacia el oeste y sobre la costa norte del estuario, se encuentran, según el orden de aparición, las monoboyas (SBM) para la carga/descarga de hidrocarburos, ubicadas en Punta Ancla y Punta Cigüeña; el muelle comercial de Puerto Rosales y la Base Naval Puerto Belgrano, principal apostadero de la flota de guerra de la Armada Argentina.

Continuando la navegación hacia el interior del estuario, se pueden observar las instalaciones que constituyen el Puerto de Ingeniero White, entre las cuales se encuentra, en primer lugar, el muelle de la central termoeléctrica Luis Piedrabuena, originalmente construido para la recepción de carbón para el funcionamiento de la misma, aunque posteriormente adaptado para la carga de cereales. A continuación se hallan las instalaciones especializadas para la carga de cereales y subproductos, y hacia el oeste los muelles para cargas generales.

En la zona denominada Cangrejales se encuentran los muelles de la planta de fertilizantes de la empresa Profertil S.A. y de la planta separadora de gases de la Compañía Mega S.A.

Adentrándose en el estuario, se ubica Puerto Galván, constituido por diversos muelles destinados a cereales y subproductos, carga general y combustibles líquidos y gaseosos.

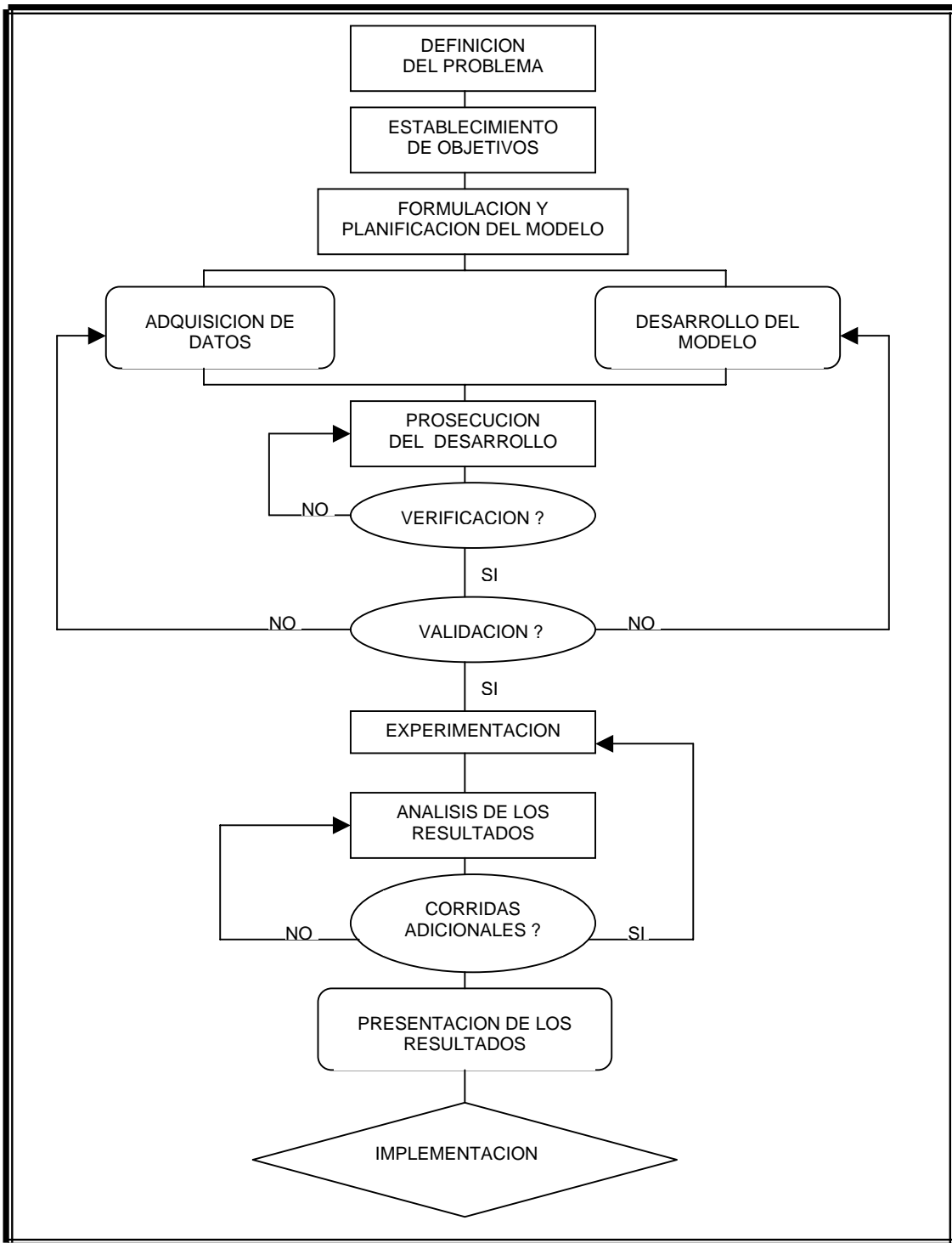


Figura Nº 1 - Secuencia de diseño de un Modelo de Simulación

3.2 - Puerto de Ingeniero White

Dentro del Puerto de Ingeniero White pueden distinguirse dos áreas netamente diferenciadas en función del tipo de mercadería con la que operan.

Figura N° 2 - Canal de Acceso al Puerto de Bahía Blanca

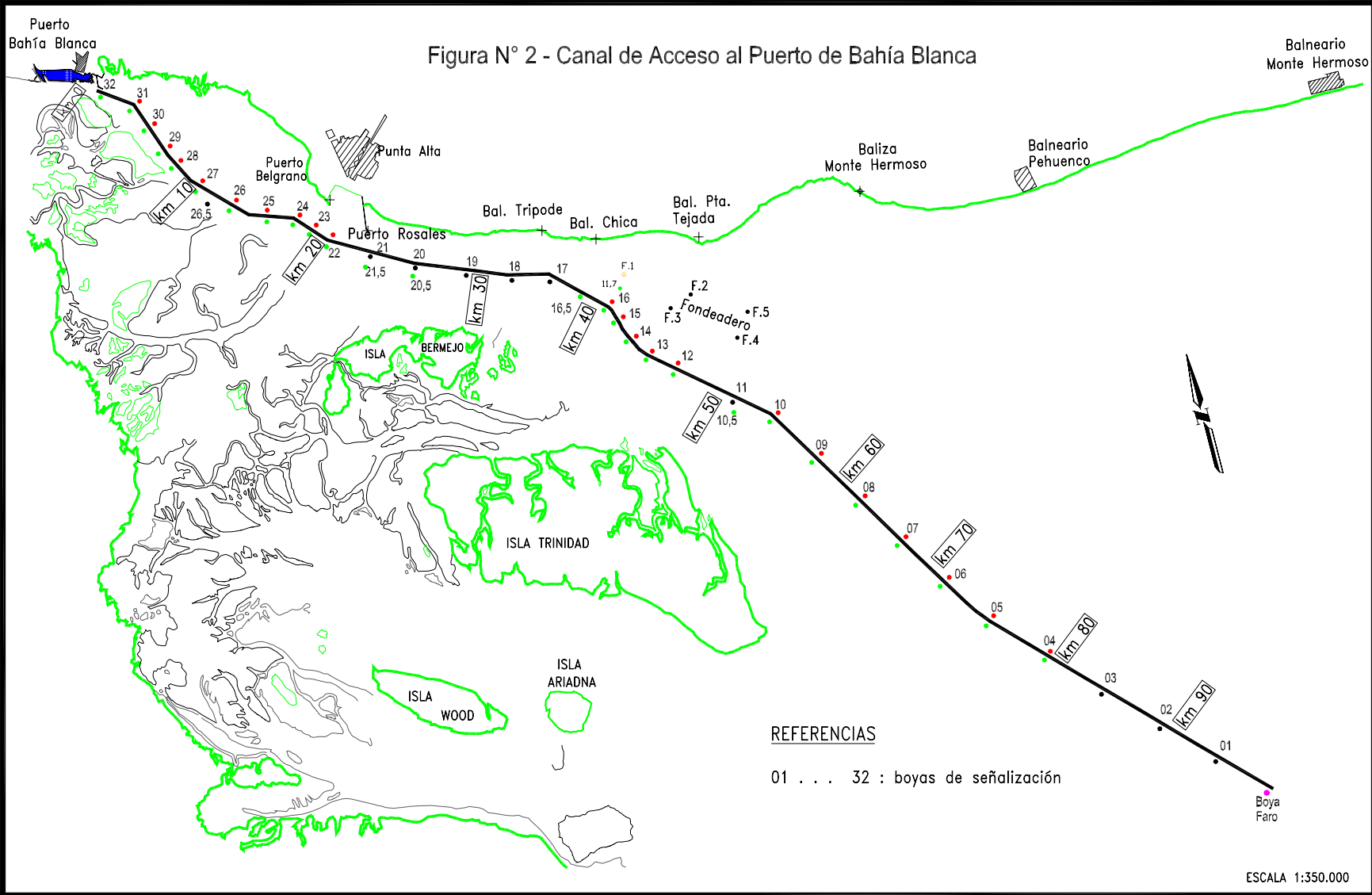
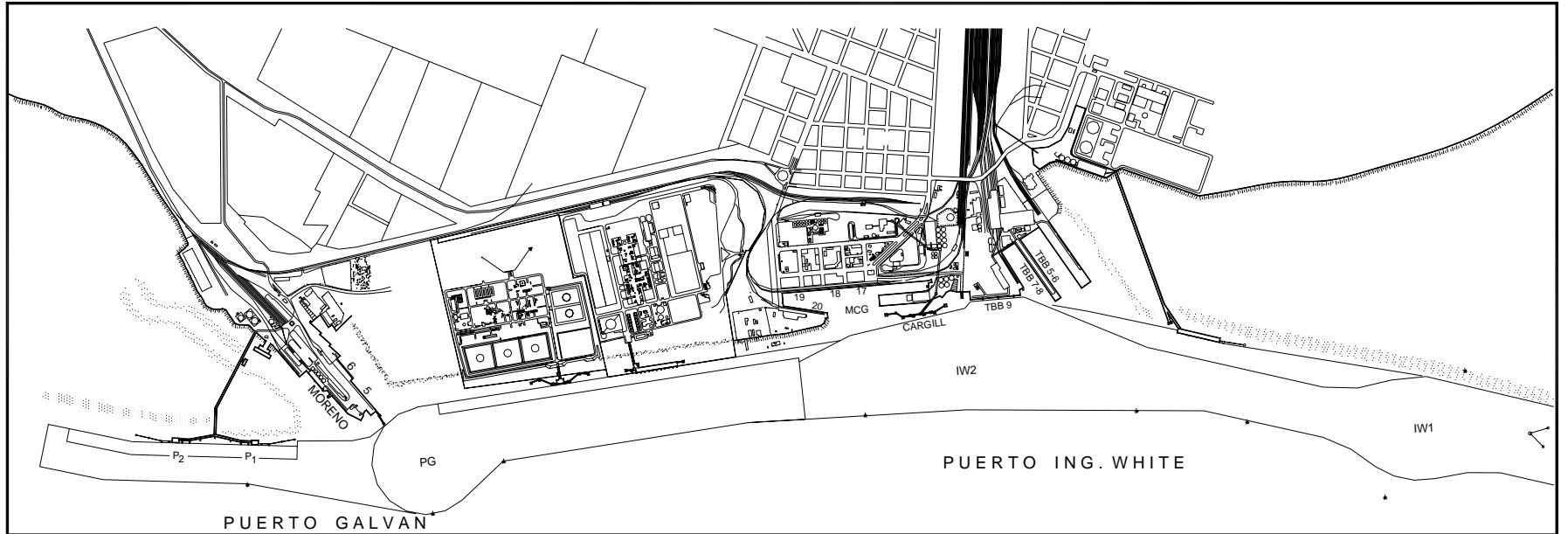


Figura N° 3 - Puerto de Bahía Blanca



El área destinada a la carga de cereales y subproductos, la que está constituida por las terminales que operan las firmas Glencore-Toeffer U.T.E., Terminal Bahía Blanca S.A. y Cargill S.A.I.C.

Hacia el oeste, encontramos el área destinada al movimiento de mercaderías generales (Muelle Ministro R. Carranza), la que cuenta con amplias instalaciones de almacenaje. Este sector se desarrolló originalmente a partir del flujo de cargas enfriadas y congeladas, especialmente frutas y pescado, razón por la cual se halla dotado de una excelente capacidad frigorífica.

Actualmente se encuentra en construcción un muelle multipropósito para el manipuleo de cargas generales convencionales, bultos pesadas y contenedores, cuyo emplazamiento se encuentra en cercanías del actual Sitio 21.

3.3 - Puerto Galván

Este sector fue desarrollado a principios de siglo como terminal cerealera por el ferrocarril Pacífico y posteriormente ha ido diversificando su actividad operativa.

Entre sus instalaciones encontramos, en primer lugar, una terminal de cereales y subproductos, operada por la firma Oleaginosa Moreno Hnos. S.A.; y una zona destinada a mercaderías generales, que cuenta con grúas eléctricas de pórtico de 35 ton. de capacidad máxima, aptas para trabajar con gancho, grampa para graneles y spreader para contenedores.

Seguidamente, se ubica la denominada Posta para Inflamables, especializada en combustibles líquidos y gaseosos y productos petroquímicos, que cuenta con 2 sitios de atraque (Posta N° 1 y N° 2).

3.4 - Desarrollo del Modelo - Esquematización

En primer lugar se procedió a esquematizar el sistema, esto es, simplificar la estructura del puerto de manera tal de conservar los elementos cuya ausencia pudiera llegar a modificar sustancialmente los resultados de la aplicación, eliminando aquellos sin trascendencia.

Esta esquematización se llevó a cabo en cuatro campos fundamentales: tipos de buques; canal de acceso; sitios de atraque y fondeaderos; y círculos de giro (Figura N° 4).

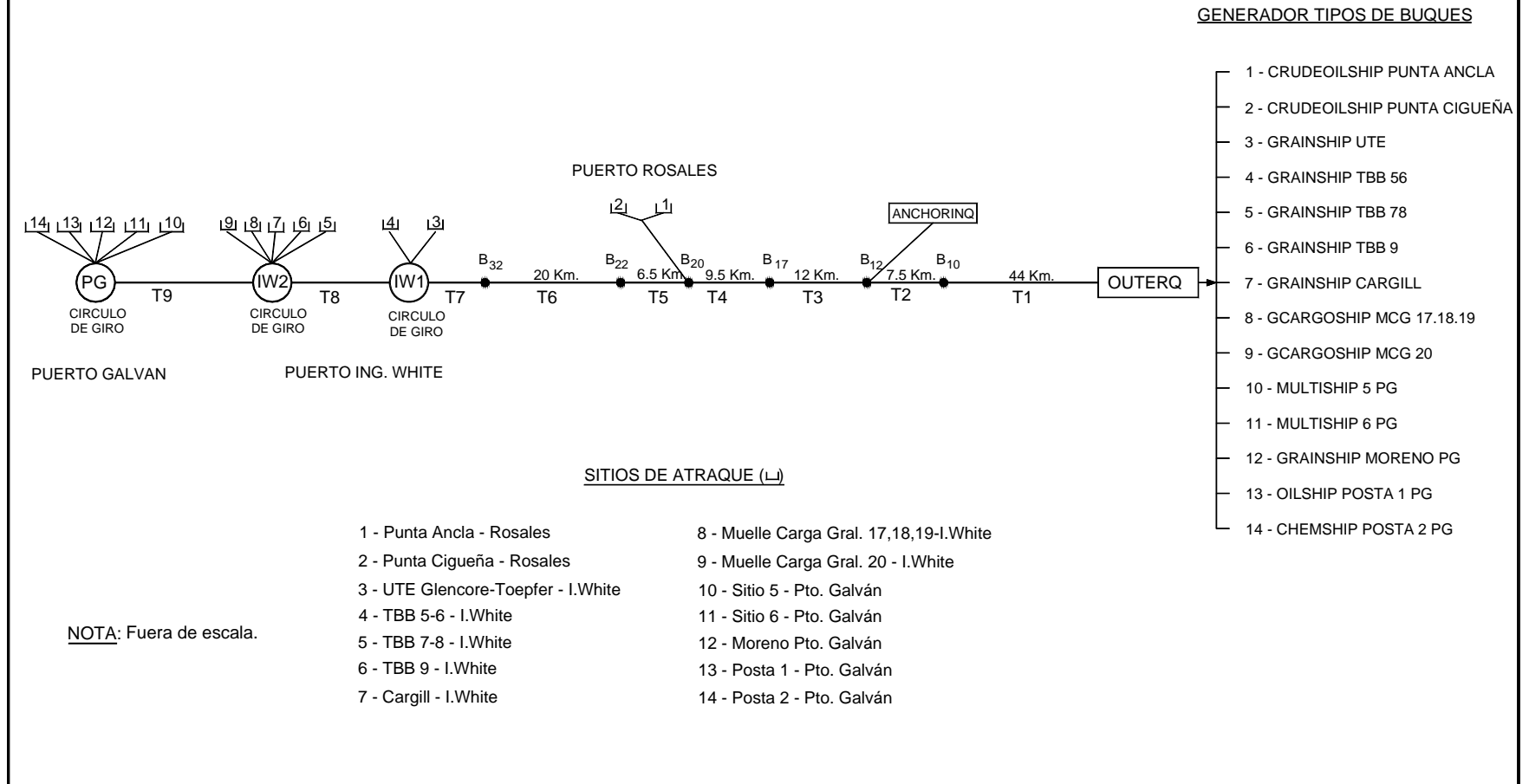
▪ Tipos de buques

Se consideraron catorce (14) tipos de buques, los cuales se ingresaron al sistema como entidades (ENTITIES), conforme a la siguiente nomenclatura específica:

1. CRUDEOILSHIP PUNTA ANCLA
2. CRUDEOILSHIP PUNTA CIGUENA
3. GRAINSHIP UTE
4. GRAINSHIP TBB 56
5. GRAINSHIP TBB 78
6. GRAINSHIP TBB 9
7. GRAINSHIP CARGILL
8. GCARGOSHIP MCG 17.18.19
9. GCARGOSHIP MCG 20
10. MULTIPSHIP 5 PG
11. MULTIPSHIP 6 PG
12. GRAINSHIP MORENO PG
13. OILSHIP POSTA1 PG
14. CHEMSHIP POSTA 2 PG

Cada uno de ellos ingresa al sistema con una serie de atributos o características propias, tales como, eslora entre perpendiculares (LENGTH), manga (BEAM), carga/descarga (LOAD/UNLOAD), calado

Figura N° 4 - Esquematzación del sistema



GENERADOR TIPOS DE BUQUES

- 1 - CRUDEOILSHIP PUNTA ANCLA
- 2 - CRUDEOILSHIP PUNTA CIGUEÑA
- 3 - GRAINSHIP UTE
- 4 - GRAINSHIP TBB 56
- 5 - GRAINSHIP TBB 78
- 6 - GRAINSHIP TBB 9
- 7 - GRAINSHIP CARGILL
- 8 - GCARGOSHIP MCG 17.18.19
- 9 - GCARGOSHIP MCG 20
- 10 - MULTISHIP 5 PG
- 11 - MULTISHIP 6 PG
- 12 - GRAINSHIP MORENO PG
- 13 - OILSHIP POSTA 1 PG
- 14 - CHEMSHIP POSTA 2 PG

SITIOS DE ATRAQUE (L)

- | | |
|------------------------------------|---|
| 1 - Punta Ancla - Rosales | 8 - Muelle Carga Gral. 17,18,19-I.White |
| 2 - Punta Cigueña - Rosales | 9 - Muelle Carga Gral. 20 - I.White |
| 3 - UTE Glencore-Toepfer - I.White | 10 - Sitio 5 - Pto. Galván |
| 4 - TBB 5-6 - I.White | 11 - Sitio 6 - Pto. Galván |
| 5 - TBB 7-8 - I.White | 12 - Moreno Pto. Galván |
| 6 - TBB 9 - I.White | 13 - Posta 1 - Pto. Galván |
| 7 - Cargill - I.White | 14 - Posta 2 - Pto. Galván |

NOTA: Fuera de escala.

de entrada (DRAUGHT_IN), calado de salida (DRAUGHT_OUT) y tiempo de servicio (SERVICE_TIME).

La secuencia de arribos para cada una de las clases (ARRIVALS) puede ser ingresada siguiendo un patrón secuencial según una curva estadística conocida (Poisson, Normal, Exponencial, Beta, etc.) o según una tabla de distribución diseñada por el modelador.

A su vez, cada uno de los atributos, puede ser asociado a cada buque que ingresa al sistema, según un muestreo al azar de curvas estadísticas conocidas, funciones tabuladas o fórmulas matemáticas.

▪ **Canal de Acceso**

El canal de acceso al puerto de Bahía Blanca tiene una extensión de 97 km., tal lo citado anteriormente, a lo largo del cual la navegación posee restricciones al sobrepaso y encuentro de buques, según los tramos, tomando como parámetro de comparación las dimensiones de su manga.

Buques con mangas menores de 25 m. no poseen restricción alguna para sobrepaso y encuentro, en tanto que aquellos con mangas mayores, solamente tendrán permitido el encuentro o adelantamiento a otro buque, en los siguientes tramos:

- Par de Boyas 10 a 12.
- Par de Boyas 17 a 22.

En cuanto a la restricción por la incompatibilidad entre el calado del buque y la profundidad variable del tirante de agua en el canal, por efecto de la marea, la misma no se tuvo en cuenta en forma directa, ya que se ha verificado que la gran mayoría de las embarcaciones en posición de salida (cargadas), esperan el nivel de marea adecuado en muelle, regulando el ritmo de carga, para salir "montando" la onda de marea, y evitar, de esta manera, la espera en el fondeadero ubicado a la altura de la Boya 11.

Por lo tanto, las consecuencias de este efecto fueron indirectamente incorporadas dentro del tiempo de servicio (SERVICE_TIME) de cada una de las embarcaciones.

De acuerdo a ello, y considerando algunas características particulares de la navegación en el acceso y salida del complejo portuario de Bahía Blanca, el canal fue esquematizado dividiéndolo en diferentes tramos, los que fueron tratados, en el lenguaje de simulación, como colas de espera:

- Tramo 1: Boya Faro - Boya 10 (OUTERQ_BUOY10)
- Tramo 2: Boya 10 - Boya 12 (BUOY10_BUOY12)
- Tramo 3: Boya 12 - Boya 17 (BUOY12_BUOY17)
- Tramo 4: Boya 17 - Boya 20 (BUOY17_BUOY20)
- Tramo 5: Boya 20 - Boya 22 (BUOY20_BUOY22)
- Tramo 6: Boya 22 - Boya 32 (BUOY22_BUOY32)
- Tramo 7: Boya 32 - Círculo de Giro 1 de Ing. White (BUOY32_IW1)
- Tramo 8: Círculo de Giro 1 de Ing. White - Círculo de Giro 2 de Ing. White (IW1_IW2)
- Tramo 9: Círculo de Giro 2 de Ing. White - Círculo de Giro Pto. Galván (IW2_PG)

Estos tramos fueron tratados como vías de navegación de doble mano (IN_OUT), evaluándose las restricciones para cada uno de ellos, en el momento del ingreso del buque a cada tramo.

▪ **Sitios de Atraque**

Los sitios de atraque (LOCATIONS) considerados, coinciden en general, con los tipos de buques generados en el sistema, esto es, cada buque se asocia con un lugar específico de operaciones, dejando de lado los cambios de sitio de una misma embarcación, movimientos muy escasos en el Puerto de Bahía Blanca.

Por lo tanto, en la esquematización del sistema, pueden identificarse los siguientes sitios:

- Punta Ancla (PUNTA_ANCLA_BERTH)
- Punta Cigüeña (PUNTA_CIGUENA_BERTH)
- Glencore-Toepfer UTE (UTE_BERTH)
- Terminal Bahía Blanca - Sitio 5/6 (TBB_56_BERTH)
- Terminal Bahía Blanca - Sitio 7/8 (TBB_78_BERTH)
- Terminal Bahía Blanca - Sitio 9 (TBB_9_BERTH)
- Cargill (CARGILL_BERTH)
- Muelle de Carga General - Sitios 17, 18 y 19 (MCG_17_18_19_BERTH)
- Muelle de Carga General - Sitio 20 (MCG_20_BERTH)
- Sitio 5 - Pto. Galván (MULTIP_5_BERTH)
- Sitio 6 - Pto. Galván (MULTIP_6_BERTH)
- Moreno (MORENO_BERTH)
- Muelle de Inflamables - Posta 1 (POSTA1_BERTH)
- Muelle de Inflamables - Posta 2 (POSTA 2_BERTH)

La versatilidad del modelo permite agregar y/o eliminar cualquier sitio de atraque en forma rápida, analizando el impacto que en el sistema podría ocasionar esta alternativa.

Esta característica del modelo es fundamental para la determinación del número de sitios de atraque óptimo de una o varias terminales del puerto, a través de un análisis económico que coteje los tiempos ociosos de las instalaciones de carga/descarga de los atracaderos contra los tiempos de espera por un sitio libre por parte de los buques.

▪ **Fondeaderos y Círculos de Giro**

En el caso de los fondeaderos para espera de los buques, se estableció solamente uno, el que está ubicado a la altura de la Boya 11 (ANCHORINQ) y fue diseñado también, como una cola de espera. Su uso está pensado, según el modelo, para buques entrantes, que deben aguardar la liberación del sitio de atraque al cual se dirigen.

Los círculos de giro, previstos para la evolución de los buques previo a su ingreso a sitio, se ubicaron en los lugares tradicionalmente utilizados por las embarcaciones en sus movimientos en puerto, esto es, dos en Ing. White, uno a la altura del muelle operado por Glencore-Toepfer UTE (IW1), otro frente al Sitio 9 de Terminal Bahía Blanca S.A. (IW2) y un tercero en Puerto Galván (PG).

3.5 - Versión Verbal del Modelo

La confección del modelo propiamente dicho, exige, previamente, una estructuración lógica de las actividades que deberán ser desarrolladas por los distintos componentes o entidades.

Esta "estructuración lógica" o versión verbal del modelo, depende en su diseño, de la experiencia y criterio del modelador, el que tratará de seguir el desarrollo real de los eventos a lo largo del programa que constituye su modelo.

La versión verbal del modelo, puede ser encarada según varias metodologías, siendo una de las más eficientes la constituida por oraciones cortas que describen el fenómeno a representar. Precisamente este método fue el utilizado en el presente trabajo. Para ello, se siguió el proceso de una embarcación en su paso a través del sistema portuario esquematizado:

1. El buque aparece, o nace, para el modelo en la Boya Faro (OUTERQ_IN), según una secuencia de arribos característica para cada tipo de embarcación.
2. Luego de generado, cada buque es dotado de sus características, en términos de eslora, manga, calado de entrada y salida, carga/descarga y tiempo de servicio. Dichos parámetros pueden ser obtenidos de muestreos al azar (random) de curvas probabilísticas que ajusten adecuadamente con esas características, de tablas confeccionadas por el usuario o a través de fórmulas matemáticas.

3. Una vez que el buque se encuentra en la Boya Faro, verifica si debe cumplir las restricciones que le imponen las normas de navegación a través de la sentencia `IF BEAM < 25 THEN...`. En caso afirmativo accede al primer tramo *Boya Faro - Boya 10 (OUTERQ_BUOY10)* sin más verificaciones.

Caso contrario, evalúa si hay otro buque navegando en sentido contrario por el tramo en cuestión. De no haberlo accede al primer tramo o en su defecto, espera hasta que el mismo se libere. No se verifican sobrepasos, ya que los buques navegan a velocidades muy similares, lo que no permite, prácticamente, que se adelanten unos a otros a lo largo del canal.

4. Idénticas verificaciones se repiten al ingreso del buque a cada tramo, de corresponder.
5. Al arribar el buque a la posición del fondeadero cercano a la Boya 11 (ANCHORINQ), el mismo verifica si se encuentra libre el puesto de atraque al cual se dirige. De encontrarse vacante, accede directamente al próximo tramo del canal, con dirección a su sitio de destino. Caso contrario, accede al fondeadero, donde permanece hasta que se libere el sitio. En el fondeadero, los buques son liberados en dirección a sus atracaderos, según el orden de llegada, esto es "primero llega-primero sale" (FIFO: **F**irst **I**n-**F**irst **O**ut).
6. Una vez en el sitio, el buque opera su "tiempo de servicio" (SERVICE_TIME).
7. Finalizada su operación, desamarra y comienza la navegación de salida, verificando las restricciones, de corresponder, a lo largo de los tramos del canal.
8. Arribado a la Boya Faro, el buque desaparece del sistema, quedando registradas sus características más representativas, en la base de datos de salida que el programa genera en forma automática.

3.6 - Confección del Modelo

Una vez concluida la etapa de verbalización del modelo, es posible iniciar la escritura del mismo. Para ello se utilizó un lenguaje de cuarta generación, denominado PROMODEL versión 4.1, el que posee un muy buen soporte gráfico que permite diseñar el modelo a partir de un plano general del puerto utilizado como base (BACKGROUND). El modelo fue denominado BBCAPORTSIM versión 1.00.

El menú dedicado al diseño de los distintos elementos del modelo (BUILD), brinda la posibilidad de ir incorporando los mismos al modelo, en forma secuencial. En nuestro caso, los elementos incorporados son:

- Lugares (LOCATIONS): sitios de atraque, canal de acceso, fondeadero y círculos de giro.
- Entidades (ENTITIES): buques.
- Arribos (ARRIVALS): arribo de las entidades (buques) al sistema, asociadas con todos los atributos diseñados para las mismas (eslora, manga, carga/descarga, etc.).
- Proceso (PROCESSING): proceso de las entidades en el sistema (ejº: navegación, operación en el sitio, espera en fondeadero y tramos del canal, etc.).

Además de estos módulos principales, el funcionamiento del modelo requiere el diseño de una serie de elementos adicionales, tales como archivos de salida para el acopio de datos generados por el modelo (EXTERNAL FILES); corrientes de números random origen de muestreos (STREAMS); variables (VARIABLES) identificatorias de distintos elementos, por ejº verificador de sitio o tramo de canal ocupado; etc.

En la Figura Nº 5 se presenta, para una mejor comprensión, el proceso seguido por un buque del tipo GCARGOSHIP_MCG_20 durante su paso por el sistema.

Figura Nº 5 - Proceso buque GCARGOSHIP_MCG_20

ENTITY	LOCATION	OPERATION	BLK.	OUTPUT	DESTINATION	RULE	MOVE LOGIC
GCARGOSHIP_MCG_20	OUTERQ_IN	WAIT UNTIL BEAM_9<25 OR BUOY10_OUTERQ_OUT=0	1	GCARGOSHIP_MCG_20 OUTERQ_BUOY10_IN = OUTERQ_BUOY10_IN + 1 MOVE ON UTERQ_IN_BUOY10_INQ OUTERQ_BUOY10_IN = OUTERQ_BUOY10_IN - 1	BUOY10_INQ	FIRST	1
GCARGOSHIP_MCG_20	BUOY10_INQ	WAIT 0	1	GCARGOSHIP_MCG_20 MOVE ON BUOY10_INQ_BUOY12_INQ	BUOY12_INQ	FIRST	1
GCARGOSHIP_MCG_20	BUOY12_INQ	IF MCG_20_BERTH >0 THEN ROUTE 1 ELSE ROUTE 2	1	GCARGOSHIP_MCG_20 MOVE ON BUOY12_INQ_ANCHORINQ	ANCHORINQ	FIRST	1
			2	GCARGOSHIP_MCG_20 MCG_20_BERTH = MCG_20_BERTH + 1 WAIT UNTIL BEAM_9<25 OR BUOY17_BUOY12_OUT = 0 BUOY12_BUOY17_IN = BUOY12_BUOY17_IN + 1 MOVE ON BUOY12_INQ_BUOY17_INQ BUOY12_BUOY17_IN = BUOY12_BUOY17_IN - 1	BUOY17_INQ	FIRST	1
GCARGOSHIP_MCG_20	ANCHORINQ	WAIT UNTIL MCG_20_BERTH = 0 MCG_20_BERTH = MCG_20_BERTH + 1	1	GCARGOSHIP_MCG_20 MOVE ON ANCHORINQ_BUOY12_INQ_ALT	BUOY12_INQ_ALT	FIRST	1
GCARGOSHIP_MCG_20	BUOY12_INQ_ALT	WAIT 0	1	GCARGOSHIP_MCG_20 WAIT UNTIL BEAM_9<25 OR BUOY17_BUOY12_OUT=0 BUOY12_BUOY17_IN = BUOY12_BUOY17_IN + 1 MOVE ON BUOY12_INQ_ALT_BUOY17_INQ BUOY12_BUOY17_IN = BUOY12_BUOY17_IN - 1	BUOY17_INQ	FIRST	1
GCARGOSHIP_MCG_20	BUOY17_INQ	WAIT 0	1	GCARGOSHIP_MCG_20 MOVE ON BUOY17_INQ_BUOY20_INQ	BUOY20_INQ	FIRST	1

GCARGOSHIP_MCG_20	BUOY20_INQ	WAIT 0	1	GCARGOSHIP_MCG_20 BUOY22_INQ MOVE ON BUOY20_INQ_BUOY22_INQ	FIRST 1
GCARGOSHIP_MCG_20	BUOY22_INQ	WAIT UNTIL BEAM_9<25 OR BUOY32_BUOY22_OUT=0	1	GCARGOSHIP_MCG_20 BUOY32_INQ BUOY22_BUOY32_IN = BUOY22_BUOY32_IN + 1 MOVE ON BUOY22_INQ_BUOY32_INQ BUOY22_BUOY32_IN = BUOY22_BUOY32_IN - 1	FIRST 1
GCARGOSHIP_MCG_20	BUOY32_INQ	WAIT UNTIL IW1_TC = 0	1	GCARGOSHIP_MCG_20 IW1_INQ IW1_TC = IW1_TC + 1 MOVE ON BUOY32_INQ_IW1_INQ	FIRST 1
GCARGOSHIP_MCG_20	IW1_INQ	GRAPHIC 2 WAIT 10 MIN	1	GCARGOSHIP_MCG_20 IW2_INQ IW1_TC = IW1_TC - 1 WAIT UNTIL IW2_TC = 0 IW2_TC = IW2_TC + 1 MOVE ON IW1_INQ_IW2_INQ	FIRST 1
GCARGOSHIP_MCG_20	IW2_INQ	WAIT 15 MIN GRAPHIC 3 IW2_TC = IW2_TC -1	1	GCARGOSHIP_MCG_20 MCG_20 MOVE ON IW2_INQ_MCG_20	FIRST 1
GCARGOSHIP_MCG_20	MCG_20	WAIT SERVICE_TIME_9 MCG_20_BERTH = MCG_20_BERTH - 1	1	GCARGOSHIP_MCG_20 IW2_OUTQ MOVE ON MCG_20_IW2_OUTQ	FIRST 1
GCARGOSHIP_MCG_20	IW2_OUTQ	WAIT 0	1	GCARGOSHIP_MCG_20 IW1_OUTQ MOVE ON IW2_OUTQ_IW1_OUTQ	FIRST 1
GCARGOSHIP_MCG_20	IW1_OUTQ	WAIT 0	1	GCARGOSHIP_MCG_20 BUOY32_OUTQ MOVE ON IW1_OUTQ_BUOY32_OUTQ	FIRST 1

GCARGOSHIP_MCG_20	BUOY32_OUTQ	GRAPHIC 1 WAIT UNTIL BEAM_9<25 OR BUOY22_BUOY32_IN=0	1	GCARGOSHIP_MCG_20 BUOY22_OUTQ	FIRST 1
				BUOY32_BUOY22_OUT = BUOY32_BUOY22_OUT + 1	
				MOVE ON BUOY32_OUTQ_BUOY22_OUTQ	
				BUOY32_BUOY22_OUT = BUOY32_BUOY22_OUT - 1	
GCARGOSHIP_MCG_20	BUOY22_OUTQ	WAIT 0	1	GCARGOSHIP_MCG_20 BUOY20_OUTQ	FIRST 1
				MOVE ON BUOY22_OUTQ_BUOY20_OUTQ	
GCARGOSHIP_MCG_20	BUOY20_OUTQ	WAIT 0	1	GCARGOSHIP_MCG_20 BUOY17_OUTQ	FIRST 1
				MOVE ON BUOY20_OUTQ_BUOY17_OUTQ	
GCARGOSHIP_MCG_20	BUOY17_OUTQ	WAIT UNTIL BEAM_9<25 OR BUOY12_BUOY17_IN = 0	1	GCARGOSHIP_MCG_20 BUOY12_OUTQ	FIRST 1
				BUOY17_BUOY12_OUT = BUOY17_BUOY12_OUT + 1	
				MOVE ON BUOY17_OUTQ_BUOY12_OUTQ	
				BUOY17_BUOY12_OUT = BUOY17_BUOY12_OUT - 1	
GCARGOSHIP_MCG_20	BUOY12_OUTQ	WAIT 0	1	GCARGOSHIP_MCG_20 BUOY10_OUTQ	FIRST 1
				MOVE ON BUOY12_OUTQ_BUOY10_OUTQ	
GCARGOSHIP_MCG_20	BUOY10_OUTQ	WAIT UNTIL BEAM_9<25 OR OUTERQ_BUOY10_IN=0	1	GCARGOSHIP_MCG_20 OUTERQ_OUT	FIRST 1
				BUOY10_OUTERQ_OUT = BUOY10_OUTERQ_OUT + 1	
				MOVE ON BUOY10_OUTQ_OUTERQ_OUT	
				BUOY10_OUTERQ_OUT = BUOY10_OUTERQ_OUT - 1	
GCARGOSHIP_MCG_20	OUTERQ_OUT	WAIT 0	1	GCARGOSHIP_MCG_20 EXIT	FIRST 1

3.7 - Verificación del modelo

Cuando el modelo trabaja según la secuencia de tareas lógicas encomendadas, siguiendo para ello una serie cronológica de instrucciones, se dice que el mismo *"verifica"*.

En el caso particular del modelo BBCAPORTSIM, se utilizaron dos opciones provistas por el lenguaje de programación: TRACE y DEBUG, con el objeto de llevar adelante el proceso de verificación.

La opción TRACE permite seguir los eventos que se van produciendo en el modelo, en forma secuencial continua o paso a paso. El listado de los eventos se puede leer directamente sobre la pantalla o enviar a archivo o impresora, para su análisis en tiempo diferido.

La opción DEBUG permite seguir el proceso, paso a paso, de la lógica del modelo, verificando no sólo su comportamiento, sino el de los atributos y las variables involucradas.

Otra herramienta que se utilizó en forma paralela, fue la animación, la que permite seguir visualmente el desempeño de las entidades, para lo cual se puede variar la velocidad de simulación hasta un punto tal que permita una cómoda verificación visual. La animación se utilizó en forma conjunta con las opciones anteriores.

Asimismo, se verificaron los resultados producidos por el modelo, contrastándolos con valores existentes de otros sistemas similares. Para esto último, asumió vital importancia la experiencia del autor en temas portuarias.

3.8 - Validación del Modelo

Producida la verificación del modelo, se pasó a la validación del mismo. La *"validación"* tiene que ver con que el modelo se comporte en forma congruente con el sistema de la vida real que representa (por ejº: que el número de buques de un cierto tipo que ingresan durante un determinado año al puerto, sea aproximadamente igual a aquel generado por el modelo).

En nuestro caso, el sistema representa el funcionamiento del Puerto de Bahía Blanca, por lo que fue necesario obtener los datos del puerto para un determinado año, en este caso el año 1999, a fin de proceder con la validación.

Para ello, se ingresaron los datos de entrada correspondientes al año 1999 y se chequearon los resultados producidos por el modelo, comparándolos con los realmente observados en el sistema real.

Los resultados producidos por el modelo, utilizados para su validación, fueron los siguientes:

- Tiempo entre arribos por buque.
- Tiempo de servicio por buque.
- Esloras por buque.
- Carga/descarga por buque.
- Carga/descarga total.
- Número de buques total.
- Factor de utilización por sitio.

La congruencia entre los resultados producidos por el modelo y aquellos recogidos de la base de datos real para el año 1999, suministrada por el Consorcio de Gestión del Puerto de Bahía Blanca, fueron analizados mediante el uso del paquete estadístico StatFit, incorporado como un módulo anexo en el lenguaje de simulación Promodel 4.1, utilizado para diseñar el modelo.

Se adjuntan a continuación los Gráficos Nº 1, 2, 3 y 4, y la Tabla Nº 1 representativos de los resultados de la validación, para ciertos tipo de buques, en algunas ocasiones, o para la totalidad del puerto, en otras, donde puede observarse el elevado grado de ajuste entre los resultados producidos por el modelo y los obtenidos de la realidad.

Gráfico Nº 1 - Tiempo entre arribos de buques - Sitio 9, TBB

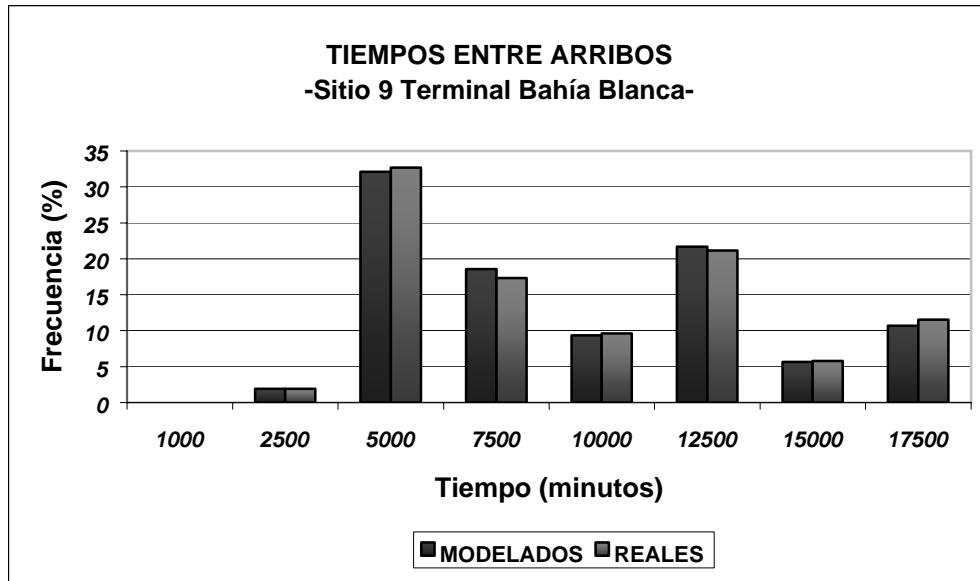


Gráfico Nº 2 - Tiempo de servicio - Punta Ancla - Pto. Rosales

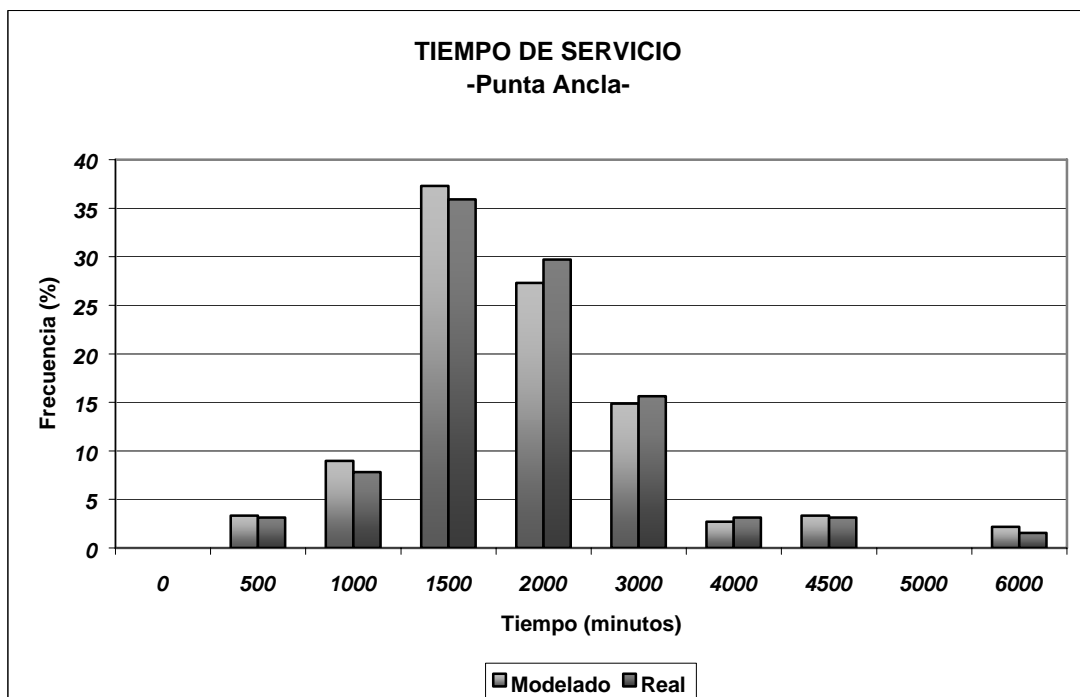


Gráfico N° 3 - Esloras totales - Muelle de Inflamables Pto. Galván - Posta 1

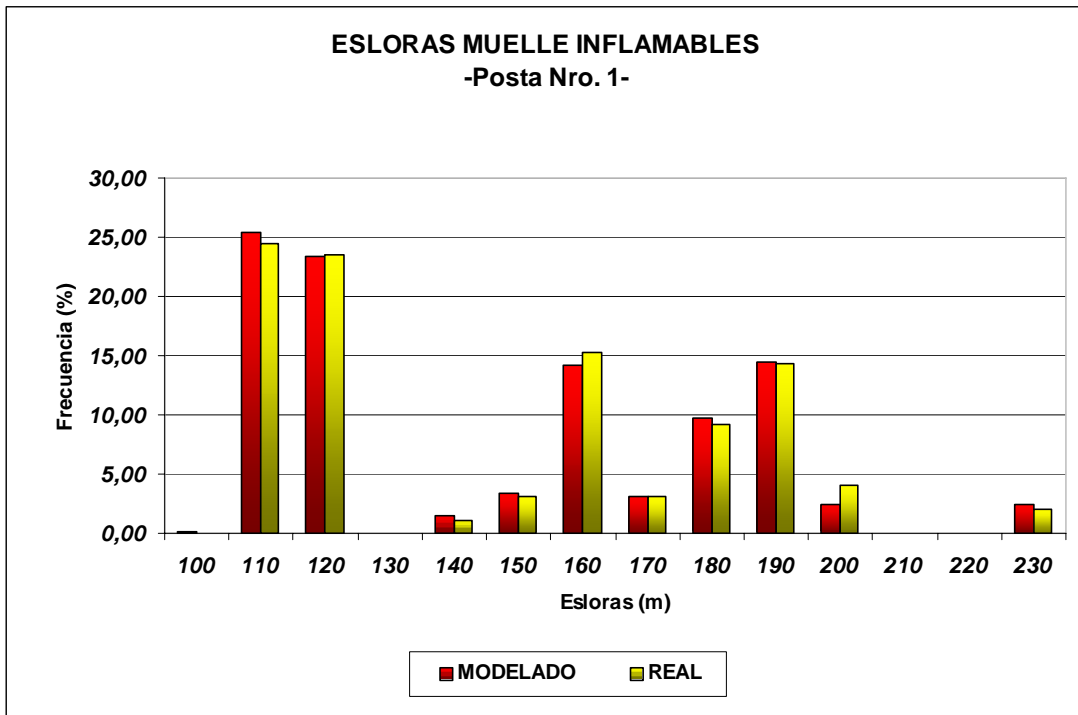
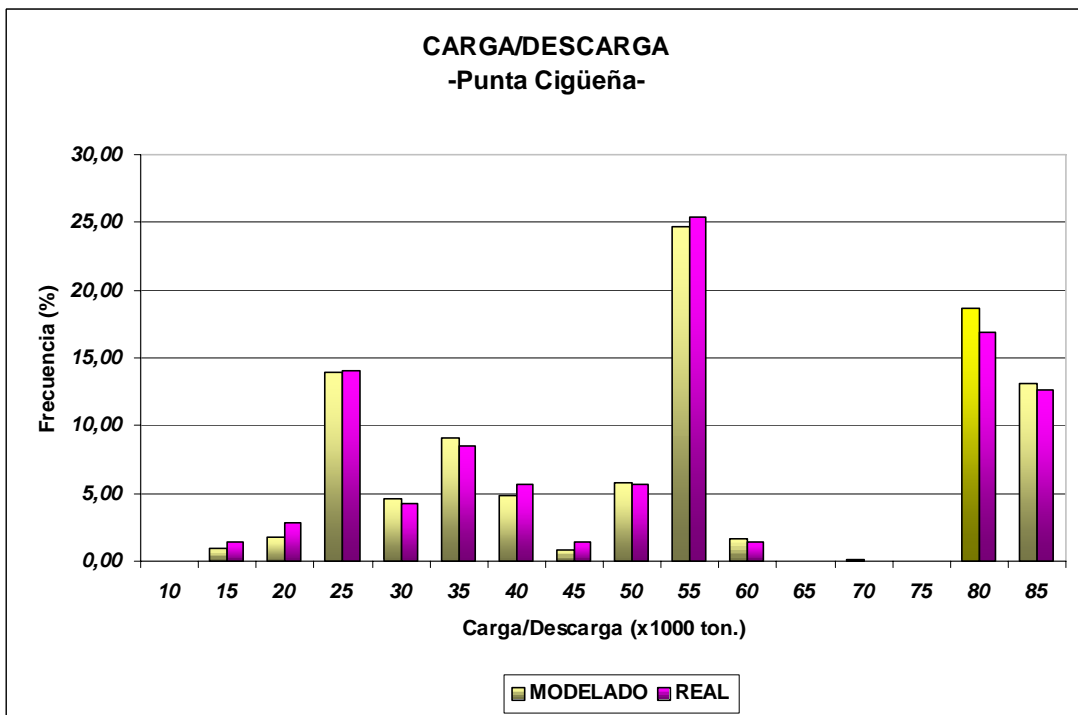


Gráfico N° 4 - Carga/descarga total - Punta Cigüeña - Pto. Rosales



A continuación se muestra, en la Tabla N° 1, las cifras totalizadoras de la carga/descarga, número de buques y factor de utilización, por muelle, a fin de ejemplificar el ajuste entre los resultados producidos por el modelo BBCAPORTSIM y aquellos derivados del análisis de los datos reales del Puerto de Bahía Blanca para el año 1999.

Restaría agregar que, los resultados obtenidos del modelo, son los valores medios de doce (12) corridas consecutivas efectuadas con distintos números origen (SEED NUMBERS), utilizados por las distintas corrientes de generación de números random.

Cada corrida entrega los valores medios de los parámetros principales (factor de ocupación, número de buques, etc.), pero también los máximos y mínimos, los límites superior e inferior de los intervalos de confianza 90 % y 95 %, la desviación standard, la mediana, etc.

Tabla N° 1 - Valores totalizadores de carga/descarga, número de buques y factor de ocupación

SITIO	CARGA/DESCARGA (ton.)			NUMERO DE BUQUES (c/u)			FACTOR OCUPACION (%)		
	Real	Modelo	% Var.	Real	Modelo	% Var.	Real	Modelo	% Var.
P.Ancla	2.939.063	2.830.311	-3.70	66	64	-3.10	21.00	20.97	-0.20
P.Cigüeña	3.587.743	3.444.512	-4.00	68	66	-3.00	35.20	36.99	+5.08
UTE	1.287.952	1.349.077	+4.74	60	57	-5.00	53.00	55.47	+4.66
TBB 5-6	490.029	491.223	+0.24	32	33	+3.12	17.60	18.21	+3.46
TBB 7-8	29.269	31.005	+5.90	5	5	0.00	1.53	1.58	+3.26
TBB 9	1.016.951	1.045.521	+2.81	56	55	-1.80	32.50	32.28	-0.70
CARGILL	1.409.217	1.407.218	-0.15	87	85	-2.30	49.20	47.35	-3.80
M.C.G.17, 18 Y 19	15.121	14.260	-5.70	28	30	+7.10	46.90	49.06	+4.60
M.C.G. 20	49.316	48.157	-2.40	22	23	+4.50	33.12	35.15	+6.10
SITIO 5	224.970	226.487	+0.67	48	50	+4.10	49.05	50.19	+2.30
SITIO 6	38.347	37.934	-1.10	17	16	-5.90	13.04	12.45	-4.60
MORENO	954.171	931.271	-2.40	65	63	-3.10	38.74	36.90	-4.80
POSTA 1	823.031	815.251	-0.95	95	99	+4.20	56.00	55.00	-1.80
POSTA 2	752.724	748.758	-0.63	168	175	+4.16	54.61	58.07	+6.33
TOTALES	13.617.904	13.420985	-1.45	817	821	+0.49	--	--	--

4 - BIBLIOGRAFIA

- Bateman, R.; Bowden, R.; Gogg, T.; Harrell, Ch.; Mott, J.; 1997. System improvement using simulation. Promodel Corporation, Utah, USA: 1-173.
- Frankel, E., 1984. Systems reliability and risk analysis. Nijhoff, The Hague, The Netherlands: 1-423.
- Frankel, E., 1987. Port planning and development. Wiley-Interscience, New York: 1-795.
- Ginés, C., 1990. Ship traffic analysis through de access channel to Bahía Blanca Port. International Institute for Hydraulic and Environmental Engineering (IHE), Delft, The Netherlands: 1-162.
- Ginés, C.; Garelli, M.A.; Escudero D.; 1999. Los modelos de simulación como herramientas para la gestión portuaria. Primer Congreso Argentino de Ingeniería Portuaria, Buenos Aires - Argentina: 1-15.
- Groenveld, R., 1989. Service systems in port engineering. IHE, Delft, The Netherlands: 1-47.
- Kruk, C.B., 1989. Merchant shipping. IHE, Delft, The Netherlands: 1-150.
- Promodel Corporation, 1998. Promodel User's Guide. Promodel Corporation, Utah - USA: 1-659.
- Sierenberg & de Gans bv., 1987. Personal Prosim textbook. Waddinxveen, The Netherlands: 1-162.
- United Nations Conference on Trade and Development (TD/B/C.4/175/Rev.1), 1985. Port Development: A handbook for planners in developing countries. Ginebra - Suiza: 1-227.
- United Nations Conference on Trade and Development (UNCTAD/SHIP/188 (Part III) GE.79/56691), 1979. Manual de Administración Portuaria, Parte III - Planificación de Puertos, New York - USA: 1-278.
- Winkelmans W. & Groenveld R., 1987. Economic optimization of the wet infrastructure of ports in developing countries with capacity simulation models. Beijing, China. Conference on Coastal & Port Engineering in Developing Countries: 1-16.