

SIMULACIÓN EN LA ACADEMIA DE GUERRA NAVAL

*Onofre Torres Colvin
Capitán de Fragata*

INTRODUCCION

La simulación en la Armada no es algo nuevo; por el contrario, ha existido siempre tanto para adiestrarse en el uso de armamentos o equipos como para comprobar la planificación militar.

Las Fuerzas Armadas se han mantenido siempre a la cabeza en materia de simulación, dadas las características tan particulares de la profesión militar; la Armada ha sido pionera en Chile en esta aplicación, y la Academia de Guerra Naval siempre ha contado con esta valiosa ayuda a la instrucción.

El propósito de este artículo es informar al lector sobre algunos aspectos básicos de la simulación y sus principales aplicaciones en el Centro de Entrenamiento Táctico de la Academia de Guerra Naval (CENTAC), donde cada día se obtiene nuevas experiencias y un mayor rendimiento en el uso de esta herramienta en beneficio de la institución.

Gran parte del contenido de este artículo fue obtenido por el autor en la Escuela de Guerra Naval de España, por lo que no todos los ejemplos corresponden al sistema empleado por el simulador del CENTAC sin embargo son válidas para comprender la problemática del tema.

En la primera parte del artículo se explica qué es la simulación; en la segunda parte, cómo se realiza esta simulación, y en la tercera, qué aplicaciones tiene la simulación en la Academia de Guerra Naval.

I. -LA SIMULACIÓN

¿Qué es la simulación?

Según el Diccionario de la Real Academia de la Lengua, la simulación es: Reproducción de un proceso o un fenómeno mediante otro más sencillo o más cómodo de manejar, que evolucione de manera homóloga al primero.

La simulación en general tiene como razón de ser la búsqueda de un factor humano importantísimo en la toma de decisiones e imposible de obtener sin la ayuda del tiempo. Nos referimos a la "experiencia". Por ello, la simulación pretende una traslación artificiosa del individuo en el tiempo, de forma que se vea sometido a una serie de situaciones también artificiales que se ha de resolver. De esta forma, al presentársele una situación completamente real y similar a las anteriores, dispone de un bagaje de experiencia obtenida artificialmente para acertar en la toma de la decisión correcta.

Aunque el número de libros publicados sobre la simulación es reducido, el número de artículos aparecidos ha proliferado. Ello se debe a que las técnicas concretas para resolver los problemas son muy diversas. Podemos decir que la simulación tiene algo de arte, ya que

cada caso suele tener un tratamiento distinto y suelen ser soluciones más o menos ingeniosas para resolver el problema.

Ocurre muy frecuentemente que un fenómeno no se puede modelizar de una forma analítica para dar una explicación global del mismo, pero tenemos la posibilidad casi siempre de descomponerlo en fenómenos elementales a los que se les puede considerar conexos para relaciones de causa-efecto. La unión del conjunto de estos sucesos elementales será el modelo buscado. Así llegamos al concepto de "sistema" que relaciona estos sucesos elementales.

El término "sistema" se utiliza de tal diversidad de maneras que es difícil llegar a una definición suficientemente extensa para que abarque sus muchos usos y que al mismo tiempo, sea lo bastante concisa para que tenga un propósito útil. En consecuencia, y teniendo en cuenta el empleo que de dicho término vamos a hacer, puede resultar válida una definición lo más general posible, tal como la siguiente:

"Un sistema es un conjunto de entes relacionados entre sí y concurrente a un mismo fin".

A manera de ejemplo de un sistema conceptualmente simple, podemos considerar el piloto automático de una aeronave. Un giróscopo detecta la diferencia entre la dirección real y la deseada, enviando una señal para mover las superficies de control. Como respuesta al movimiento de las superficies de control, la aeronave gira en la dirección deseada.

El concepto de "simulación" causa a veces cierta confusión debido a la ausencia de una terminología formalmente aceptada. En su sentido más amplio, "simular" significa, como hemos visto, reproducir la esencia de una actividad o fenómeno, y en general de un sistema, sin llegar a la realidad misma; sin embargo, y al tenor de lo dicho, parece como si sólo se pudiesen simular sistemas reales y, lo que es más importante, no parece existir un objetivo a cubrir por esa simulación. Pues bien, nuestra acepción de la simulación es aquella que incluye como objetivo el estudio y conocimiento del sistema simulado y que acepta que dicho sistema pueda no ser real. Según esto, la simulación así entendida puede definirse como:

"La reproducción de un sistema real o *imaginario* mediante otro más sencillo y más adecuado para su estudio".

Si tenemos en cuenta que en un combate existen unos entes, los combatientes y las armas por ellos utilizadas, que éstos se encuentran relacionados mediante las decisiones de los primeros y los efectos de las segundas, y que todo ello tiene como fin la derrota del enemigo, podemos concluir afirmando que un combate constituye un sistema. Ahora bien, unas maniobras militares ¿acaso no representan un combate?, y la finalidad de las mismas ¿no es la de obtener un conocimiento de ese combate?. Si esto es así, parece obvio establecer que las maniobras que realiza cualquier ejército son realmente simulaciones de los diversos combates en que puede verse envuelto ese ejército.

Causas de la simulación

Para estudiar un sistema no hay nada mejor que experimentar con el mismo. Sin embargo, el objetivo de muchos estudios de sistemas es predecir la manera en que se comportará un sistema antes de que sea construido, y es claro que no es posible experimentar con un sistema mientras está todavía en forma hipotética como es el caso del diseño de una aeronave o de un buque; una alternativa que a veces se utiliza es construir

algunos prototipos y probarlos, pero esto puede demorar mucho y resultar muy costoso. Pero incluso con un sistema existente es seguro que hay veces en las que es desaconsejable experimentar con el sistema real; así, no es lógico estudiar el sistema *Exocet* mediante el lanzamiento real de estos costosos misiles. Por último, hay sistemas en los que, por su propia naturaleza, es imposible la experimentación sobre ellos; este es el caso de los ejércitos en su preparación para la guerra, en la que por motivos obvios han de esforzarse por conocer un sistema sin jamás llegar a utilizarlo.

De lo dicho anteriormente se deduce que, en multitud de casos, si queremos llegar al conocimiento de ciertos sistemas no queda más remedio que recurrir a la simulación de los mismos. Para ello, y en cada caso, sustuiremos la esencia del sistema por una aproximación razonable que incorpore la mayor parte de los aspectos importantes del mismo, y de manera que la información que suministre sea explicativa del sistema.

II. REALIZACION DE LA SIMULACIÓN

La aplicación de la simulación a muchos tipos de sistemas, unida a los distintos tipos de estudios requeridos, produce grandes variaciones en la forma en que se desarrolla la realización de una simulación. A pesar de ello puede identificarse las siguientes etapas básicas en todo proceso de simulación:

- Definición del problema.
- Establecimiento de un modelo.
- Recopilación de datos.
- Validación de modelo.
- Diseño de experimentos.
- Ejecución de la simulación.

Vamos a ir viendo en qué consiste cada una de ellas y aplicándolas a un caso hipotético: la simulación de un radar.

Definición del problema

No debe desarrollarse ningún estudio, simulación o cosa parecida hasta que haya sido enunciado claramente el problema y fijados los objetivos que se persiguen, ya que sólo entonces se estará en condiciones de determinar las características del sistema que deben reflejarse en la simulación. Consecuentemente, no debe darse por terminada esta etapa mientras no esté perfectamente definido el problema a resolver y no se conozca las relaciones causales que ligan las diversas características del sistema que han de intervenir en la simulación.

Dependiendo de la correcta ejecución de estas acciones se podrá lograr una importante reducción, tanto de costos como de tiempo; y desde luego, su influencia en la validez de la simulación realizada será manifiesta.

Consideremos nuestro caso hipotético: ¿Para qué se quiere esa simulación?, o, lo que es lo mismo, ¿Cuál es su objetivo? Imaginemos tres posibles respuestas; el simulador de radar va a ser utilizado en:

- Tipo "A". Adiestramiento del personal de mantenimiento en la reparación de averías y puesta a punto del equipo,
- Tipo "B". Adiestramiento de operadores en su utilización.

— Tipo "C". Adiestramiento de Oficiales de CIC en la utilización de la información radar.

Cada una de estas respuestas, que en mismas constituyen una clara fijación de objetivos, nos orienta hacia una simulación bien distinta de las otras dos, así, dependiendo de cada caso tendremos:

— Tipo "A". La simulación requerirá casi una reproducción de los equipos reales, con las modificaciones que permitan la simulación de averías. Será, por tanto, necesario un perfecto conocimiento de los equipos y de las causas de las averías más usuales.

— Tipo "B". En este caso la reproducción de los equipos no será necesaria ya que lo único que habrá que simular será la pantalla de presentación y los controles correspondientes ante los que ha de situarse el operador. Por el contrario, habrá que simular la aparición de ecos, tanto reales, como falsos, y los efectos de las posibles contramedidas utilizadas por el enemigo así como los correspondientes a las acciones que el operador pueda tomar frente a aquellas.

—Tipo "C". Tendremos ahora que suponer que los equipos se encuentran en perfectas condiciones y que la utilización que de los mismos hace el operador es la correcta. En consecuencia, sólo necesitaremos conocer aquellas características del equipo que influyan en si hay presentación o no y en la forma que ésta adopte.

Como acabamos de ver, según los objetivos que haya de cubrir la simulación de un sistema, el trabajo a desarrollar será diferente y por tanto también serán diferentes las características del sistema que habrá de conocer para implicarlas en la simulación. Pero como comprobaremos más adelante, también puede variar la forma física que adopte la simulación en función de los objetivos de la misma.

Establecimiento de un modelo

El objetivo final de esta etapa es la elaboración de un modelo que dé respuesta afirmativa a las siguientes preguntas: ¿Describe adecuadamente al sistema?, ¿Proporciona predicciones aceptables acerca del comportamiento del mismo?

Pero ante todo, ¿qué es un modelo? A efectos de simulación se llama "modelo" a:

"Un cuerpo de información descriptivo de un sistema hecho con fines de estudio".

Es, pues, una aproximación razonable al sistema que incorpora la mayor parte de los aspectos importantes de éste, y sin que, por otro lado, resulte tan complejo que sea imposible entenderlo o manipularlo. Ya que el propósito del estudio determina la naturaleza de la información que se reúne, no existe un modelo único de un sistema. Incluso un mismo análisis producirá distintos modelos de un mismo sistema, según varíe su comprensión del mismo. De aquí la importancia de la etapa anterior.

Es posible clasificar los modelos de simulación de diversas maneras; sin embargo, existen tres clases bien diferenciadas: modelos físicos, modelos analógicos y modelos matemáticos.

Los modelos físicos se basan en teoremas de similitud geométrica y mecánica, en su mayor parte con fundamentos empíricos. Los ejemplos mejor conocidos son los modelos a escala utilizados en los túneles de viento y canales de agua para el diseño de aeronaves y buques en ellos, las leyes bien establecidas de la similitud permiten realizar deducciones exactas relativas al comportamiento de un sistema a escala natural, a partir del modelo a escala.

Los modelos analógicos se sirven del establecimiento de correspondencias entre las variables de tipo mecánico y físico del sistema y las variables de ciertos circuitos eléctricos, de manera que el conjunto de estos sea equivalente al sistema. El simulador REDIFON que hubo en la Academia de Guerra Naval y que hoy se encuentra funcionando en la Escuela de Operaciones, está basado en un modelo de este tipo.

Los modelos matemáticos son aquellos en que las características del sistema son representadas mediante variables matemáticas, y el propio sistema queda representado por una o más funciones que interrelacionan esas variables. Como ejemplo pueden citarse las relaciones matemáticas entre variables económicas, destinadas a estudiar los efectos provocados por la variación de una de ellas sobre las demás.

La decisión sobre el tipo de modelo que se debe adoptar para una simulación depende, en cada caso, tanto del sistema a simular como de los objetivos que se pretende lograr. La importancia de tal decisión es debida a que, evidentemente, hay simulaciones para las que es más indicado un cierto tipo de modelo; así mismo, el costo puede aumentar si el modelo elegido no es el adecuado. En nuestro ejemplo, y a la vista de objetivos que en cada caso se persigue, parece lo más indicado utilizar un modelo físico, analógico o matemático, según se trate de las opciones Tipo "A"; "B" o "C", respectivamente.

Actualmente, y debido a la proliferación de los calculadores digitales, son cada día más utilizados los modelos matemáticos por su fácil implantación en aquellos. Por ello, y a partir de ahora, vamos a centrarnos en los modelos de este tipo.

Aun cuando no es posible fijar unas reglas para el diseño de los modelos matemáticos, sí puede darse unos principios descriptivos de los distintos puntos de vista desde los cuales se puede juzgar la información a incluir en el modelo. Estos principios son:

- *Formación de bloques.* La finalidad que se persigue es simplificar la especificación de las interacciones dentro del sistema. Para lograrlo, la descripción del sistema debe organizarse en una serie de bloques o subsistemas, de manera que cada uno de éstos describa una parte del sistema que dependa de pocas o, mejor, sólo de una variable. El propio sistema quedará así descrito mediante las interacciones entre los bloques, siendo su equivalencia gráfica un diagrama de bloques.

- *Relevancia.* Es conveniente que el modelo incluya únicamente aquellos aspectos del sistema que resulten relevantes para los objetivos de la simulación. La aparición de aspectos irrelevantes en el modelo no perjudica a éste, pero aumenta su complejidad y genera un trabajo no necesario, por lo que debe ser evitado.

Es pues muy importante determinar qué aspectos del sistema son necesarios tener en cuenta para la simulación, con objeto de que sólo éstos figuren en el modelo.

- *Exactitud.* Debe tenerse en cuenta el grado de exactitud de la información recabada, así como su posible variación a través del modelo con objeto de que los resultados obtenidos en la simulación resulten válidos; sin la apropiada exactitud, un modelo, aun cuando reproduzca perfectamente a un sistema, es ineficaz. Por tanto, habrá que tener en cuenta el grado de precisión requerido a los resultados que se espera obtener para, partiendo de él, fijar el que es necesario exigir a la información inicial.

- *Agregación.* Un factor adicional que debe considerarse es el grado con que debe agruparse las distintas entidades individuales en entidades más grandes. En algunos casos puede ser conveniente construir entidades artificiales mediante el proceso de agregación, para simplificar el modelo sin que por ello pierda validez. Por ejemplo, al estudiar un sistema

de defensa con misiles puede no ser necesario incluir los detalles del cómputo de la trayectoria para cada disparo, siendo suficiente representar el resultado de muchos disparos mediante una función de probabilidad.

Consideremos el tercer caso de nuestro ejemplo: construir un simulador de radar para adiestramiento de Oficiales de CIC en la utilización de la información radar. Puesto que se dijo que en esa situación parecía adecuado el diseño de un modelo matemático, vamos a construir dicho modelo aplicando los principios que se acaba de citar.

Dada la finalidad de la simulación, hay que partir de la consideración de que los equipos se encuentran al 100% de sus capacidades y que el operador es capaz de sacar el máximo rendimiento de los mismos. Los únicos aspectos del sistema que habrá que considerar serán aquellos que determinen la detección o no de un blanco y la forma en que se presenten los contactos ante el utilizador. Pues bien, la detección de un blanco por un radar es el resultado de una serie de condicionantes que podemos formular como sigue; supuesto que el blanco está dentro del horizonte radar, el lóbulo de radiación ha de cubrirlo con una probabilidad que permita su detección, y en el caso de que el enemigo no esté utilizando contramedidas o que éstas no afecten a la detección, habrá que pasar a través de la unidad supresora de interferencias para eliminar los ecos falsos antes de que el contacto aparezca en la pantalla.

Teniendo en cuenta el principio de formación de bloques; el sistema puede quedar representado por los siguientes bloques:

- Bloque 1. Comprobación de que el blanco se encuentra dentro del horizonte radar.
- Bloque 2. Verificación de que el lóbulo de radiación cubre al blanco con suficiente probabilidad.
- Bloque 3. Examen de las contramedidas existentes por si alguna de ellas imposibilita la detección.
- Bloque 4. Tratamiento por la unidad supresora de interferencias.
- Bloque 5. Presentación del contacto en la pantalla.

Si relacionamos estos bloques mediante la condición de no entrar en uno de ellos si no se ha satisfecho los anteriores, el modelo resultante puede ser una respuesta válida a nuestro problema, por lo que vamos a tratar de formalizarlos

Bloque 1

Para dos móviles cualesquiera, el horizonte radar entre ellos queda determinado mediante la fórmula.

$$D_h = 1,23 (\sqrt{H_1} + \sqrt{H_2})$$

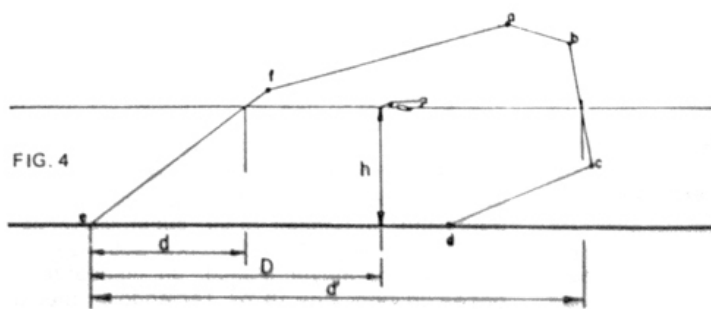
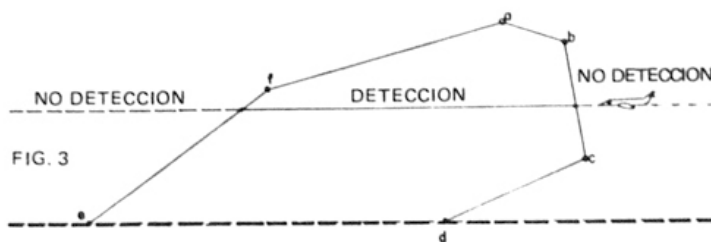
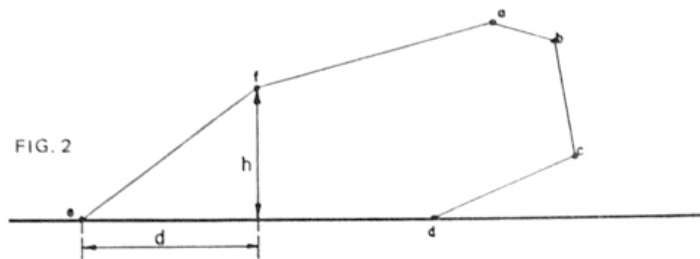
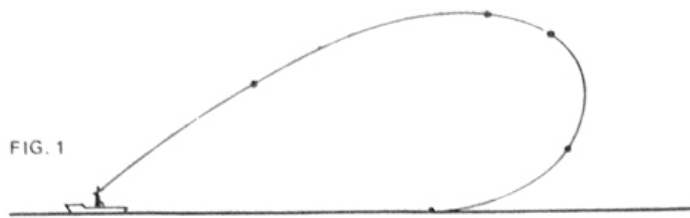
siendo: H_1 y H_2 las alturas de cada móvil, expresadas en pies.

D_h el horizonte radar, expresado en millas.

Así pues, si D es la distancia entre el radar y el blanco expresada en millas, la formulación de este bloque queda reducida a la comprobación de si D es menor o igual que D_h .

Bloque 2.

Consideremos el corte de un plano vertical con un lóbulo de radiación cualquiera. El resultado es una superficie limitada por la curva intersección del plano con la envolvente del



lóbulo, es decir, el lóbulo plano que figura en todas las publicaciones de radar (Fig. 1). Si representamos este lóbulo en un sistema de coordenadas con las ordenadas indicando alturas y las abscisas distancias, podemos sustituir la curva que delimita al lóbulo por una línea poligonal (Fig. 2), cada uno de cuyos vértices quedará determinado por una altura y una distancia, y siendo el número de estos función de la forma de la curva y de la exactitud requerida en la simulación.

Del conjunto de vértices así obtenido extraeremos dos subconjuntos; el primero (a, b, c, d) contendrá aquellos vértices cuyas abscisas indiquen las mayores distancias de detección; el segundo (e, f, a) estará formado por los vértices que tengan las abscisas indicando las menores distancias de detección (Fig. 3). De este modo habremos transformado el lóbulo plano en dos conjuntos de puntos; en uno estarán contenidas las mayores distancias de detección junto con las alturas a que éstas tienen lugar; en el otro se encontrarán las menores distancias de detección con las alturas correspondientes.

Para saber si un blanco se encuentra cubierto por un lóbulo de radiación (Fig. 4), será suficiente verificar si se halla dentro del lóbulo plano correspondiente al plano vertical que pasa por el blanco. Esto se logrará interpolando con la altura del blanco (h), y según la conocida fórmula de la recta que pasa por dos puntos, en los dos conjuntos de vértices que por el método antes indicado se hayan obtenido de dicho lóbulo plano. Si al interpolar en el primer conjunto la distancia resultante es mayor que la distancia a que se encuentra el blanco ($d > D$), interpolaremos en el segundo conjunto, y si la distancia que ahora se obtenga es menor que la distancia al blanco ($d < D$), ello querrá decir que este se encuentra dentro del lóbulo de radiación.

Hasta el momento presente hemos considerado un blanco genérico, cuando en realidad cada blanco es distinto, a efectos de su detección, en función de su "superficie reflectora equivalente de radar" (λ). Supongamos que nuestro mayor blanco, un bombardero, posee un valor λ de 16 m^2 . Teniendo en cuenta que la distancia de detección

radar viene a ser proporcional a la raíz cuarta del valor de λ , un blanco de 16 m^2 deberá ser detectado, aproximadamente, a una distancia doble que un blanco de 1 m^2 . Puesto que los lóbulos planos suministrados por los fabricantes suelen estar establecidos sobre blancos de 1 m^2 , con un 50% de probabilidades de detección, si los duplicamos obtendríamos el correspondiente lóbulo para un blanco de 16 m^2 . Dado que las probabilidades de detección no varían uniformemente, se puede considerar que un aumento de un 10% en tamaño en ese lóbulo nos daría el lóbulo plano correspondiente a un blanco de 16 m^2 con el 0% de probabilidades de detección en el borde de dicho lóbulo. Más afuera no se considera. Más adentro aumenta la probabilidad de detección.

En los lóbulos obtenidos según la transformación indicada en el párrafo anterior, es donde deberán ser calculados los dos conjuntos de puntos en los que se ha de realizar las interpolaciones ya citadas. Naturalmente, las distancias resultantes serán las correspondientes a un blanco de 16 m^2 , por lo que si el blanco tuviese un valor λ inferior, esa distancia sería mayor de la debida. Para corregir esto, las distancias obtenidas al interpolar deberán ser multiplicadas por una cantidad que llamaremos "coeficiente de reflexión", que será proporcional a la relación existente entre el λ del blanco y 16 m^2 .

Para determinar la probabilidad de detección de un blanco que se encuentre dentro de un lóbulo de radiación, aplicando el principio de agregación, podemos considerar una expresión que nos relacione la distancia al blanco con la distancia máxima de detección a esa altura, tal y como:

$$\frac{D_m - D}{D_m}$$

siendo:

D la distancia al blanco

D_m la distancia máxima de detección a esa altura.

Puesto que la cantidad resultante sería, necesariamente, menor que 1 la multiplicaríamos por una constante que la transformase en un valor comprendido entre 0 y 99; esta sería la probabilidad de detección correspondiente a la distancia a que se encontrase el blanco.

La comparación de dicha probabilidad con la producida por un generador de números aleatorios, comprendidos también entre 0 y 99, nos determinaría si la detección tiene o no lugar. Si esta comparación se efectuara con demasiada frecuencia, por ejemplo, cada un segundo habremos lanzado los datos sesenta veces por minuto, con lo que las probabilidades de que el resultado sea "detección" es mucho mayor que en la realidad. Para corregir este defecto y evitar que, por ejemplo, el radar siempre detecte o un misil siempre se trinque en un *chaff* "C", es necesario efectuar la comparación a intervalos mayores.

Para radares de superficie puede efectuarse cada veinte segundos y para radares aéreos cada diez segundos.

En el caso del *chaff* "C" depende de las características del misil y de los parámetros de lanzamiento. Si, por ejemplo, se trata de un *Exocet* con ventana chica, lo apropiado sería

probar detección desde el misil de izquierda a derecha no más de dos veces por blanco, ya sea nube *chaff* o buque.

Con otros equipos de guerra electrónica el programa debe ser más completo pero ya no se justifica para Juegos de Guerra. Un programa más perfecto se justifica para Investigación Operativa.

Bloque3

Las contramedidas más usuales contra el radar son el *jamming* y el *chaff* cuyo efecto es la pérdida de contactos en una zona de la pantalla radar atacada. Así pues, el problema será determinar los límites de esa zona e impedir que dentro de ella aparezcan contactos, supuesto evidentemente, que la contramedida está operando en la misma banda que el radar.

En el caso de un ataque por medio de *jamming*, esa zona queda determinada por un sector de X grados de amplitud, siendo X una variable dependiente del equipo que realiza el ataque, centrado en la demora del móvil que produce la interferencia. Luego, sumando y restando $X/2$ a dicha demora, obtendremos las dos demoras que nos limitan la zona ciega de la pantalla atacada. En consecuencia, para cada blanco habrá que comprobar que su demora no está comprendida entre esas demoras límite, ya que en caso contrario su detección sería imposible.

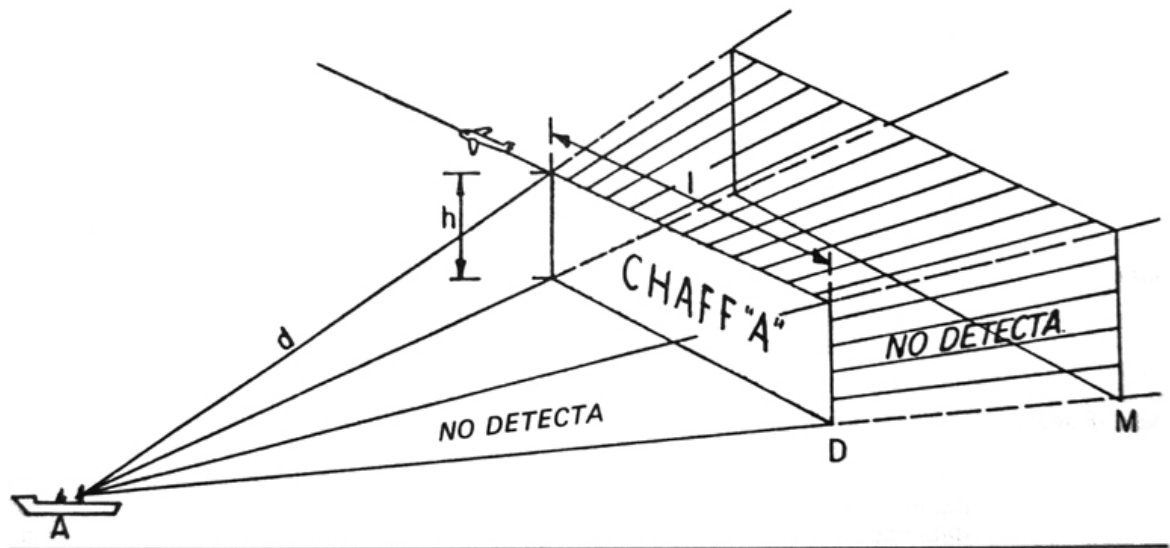
El ataque mediante *chaff* "A" lanzado desde aviones produce una cortina de longitud y altura variables que impide la detección de los blancos situados detrás de ella. Su equivalente gráfico en una pantalla de presentación radar podría ser un tronco de pirámide irregular de las siguientes características:

- El vértice de la pirámide estaría situado en el centro de la pantalla.
- La base menor se encontraría a una distancia del vértice igual a la existente entre el móvil lanzador del *chaff* y el radar atacado.
- Los lados de esa base serían iguales dos a dos, respectivamente, a la longitud y a la altura de la cortina *chaff*, según muestra la figura de la página siguiente.

En estas circunstancias habría que determinar los cuatro vértices de la cortina, así como sus demoras desde el radar atacado; a continuación comprobaríamos qué blancos caen para el radar en una demora comprendida entre esas cuatro, y para aquellos que se verificase esto calcularíamos su distancia a radar con el fin de ver si están situados delante o detrás de la cortina. Estos últimos serían los no detectados

Bloque 4

La unidad supresora de interferencias puede simularse mediante una serie de contadores, cada uno de los cuales estaría asignado a uno de los posibles blancos del radar. Cuando un blanco sea detectado en una vuelta de antena, su correspondiente contador será incrementado en una unidad y será puesto a cero cuando eso no ocurra. Si hacemos que siempre que uno de los contadores alcance un cierto valor, por ejemplo 3, el blanco al que está asignado aparezca en la pantalla radar, estaremos simulando la supresión de interferencias que realizan los radares modernos, representado en nuestro caso por la necesidad de detectar al mismo blanco en tres vueltas consecutivas de antena para darle por bueno



Siendo:	AM	Distancia máxima de detección
	AD	Distancia a la cortina
	h	Altura de la cortina
	l	Largo de la cortina

Bloque 5.

Una vez determinados qué blancos son detectados por el radar, habrá que presentarlos en la pantalla. Fijado el tipo de presentación que se desea, bien como eco bruto o bien como eco sintético con indicación de su rumbo y velocidad, el empleo de videos o de calculadores gráficos parece la técnica más adecuada para lograrlo. Es esta una decisión que queda en manos del cliente y que realmente no afecta a la validez del modelo establecido.

Con lo dicho hasta ahora hemos creado un modelo que parece aceptable para lograr la simulación de un radar para los fines propuestos. Dicho modelo, que sólo tiene en cuenta las características radar necesarias para nuestra simulación, ha sido diseñado equiparando esas características a variables matemáticas y ligándolas entre sí por medio de relaciones del mismo tipo. Es, por tanto un modelo matemático.

Recopilación de datos

Una vez formulado un modelo del sistema que se desea simular, es preciso estimar estadísticamente los valores de sus características y probar su significatividad. En esta etapa es muy importante consultar tanto los registros de datos prácticos reales de la Escuadra como los que puedan estar procesados en la Dirección de Armamentos de la Armada.

La resolución de esta etapa acude tanto al acopio de datos perfectamente conocidos como a métodos estadísticos de utilización general, cuya complejidad varía según la naturaleza del sistema.

Hay que tener en cuenta que si es importante fijar los *objetivos de la simulación* y las características del sistema que han de tenerse en cuenta en la misma para realizar un correcto modelo, igual importancia tiene la exactitud de los valores que han de tomar esas características. Dependiendo de ella variará la validez del modelo, por muy bien establecido

que esté. Naturalmente, esta exactitud quedará fijada teniendo presente la relevancia que dicha característica tenga en la simulación, aumentando con ella.

En nuestro ejemplo parece clara la relevancia que tiene la simulación del lóbulo de radiación; por ello la exactitud de los parámetros descriptivos del mismo deberá ser grande si queremos que la simulación alcance un apreciable grado de aproximación a la realidad. Por el contrario, puede ser menor la relevancia concedida al efecto *jamming*, en cuyo caso no habrá por qué conocer con exactitud el ángulo del sector de interferencia de cada equipo. Puede ser suficiente fijar un ángulo común para todos ellos, para alcanzar la precisión requerida a los fines propuestos.

Validez del modelo

Para aceptar como bueno un modelo ya formulado es necesario que antes sea probado y dé respuesta afirmativa a las dos preguntas planteadas al hablar del establecimiento del mismo. En general, hay dos cuestiones cuyas respuestas permiten fijar la validez de los modelos de simulación:

¿Existe cierta similitud entre los valores estimados de las variables utilizadas y los datos reales?

¿Qué exactitud tienen las predicciones del modelo respecto al comportamiento del sistema simulado?

Esta doble comprobación puede hacerse, en principio, con distintos *test* estadísticos conocidos: pruebas de medias, varianza, etc. No obstante, parece especialmente adecuado a gran número de casos el *test* de Kolmogorov-Smirnoff, que nos da respuesta a la pregunta:

¿Puede aceptarse con un nivel de certeza del XX% que los datos simulados y los tomados del sistema son muestras representativas de la misma población?

Si las respuestas del modelo no se ajustan a las exigencias establecidas, este deberá ser corregido, bien eliminando ciertas variables, bien incluyendo otras nuevas o revisando las relaciones funcionales establecidas entre las mismas.

En muchos casos la validez del modelo no sólo depende de que sea capaz de simular los mismos efectos que el sistema simulado, sino que además es necesario que esos fenómenos sean generados por eventos que varíen cada ciertos intervalos. Ello hace necesario que el modelo registre de alguna manera, el paso del tiempo mediante algún algoritmo que actualice un número al que se conoce como "tiempo de reloj". Generalmente, ese número vale cero al iniciarse la simulación y, posteriormente, indica cuántas unidades de tiempo simulado han transcurrido a lo largo de la simulación.

Existen dos métodos básicos para actualizar el tiempo de reloj, uno consiste en avanzar el reloj a la hora en que ha de ocurrir el siguiente evento, por ejemplo, avanzar de golpe dos fuerzas hasta la situación de contacto; el otro método se basa en avanzar el reloj a intervalos pequeños y uniformes, por ejemplo, de segundo en segundo, y determinar en cada uno de ellos si debe ocurrir un evento. Al primer método se le conoce como "orientado al evento" y del seguro se dice que está "orientado a intervalos".

En nuestro ejemplo hay dos pruebas que resultan esenciales para validar el modelo creado. La primera es comprobar si el método utilizado para generar números aleatorios es correcto, ya que su mal funcionamiento falsearía totalmente los resultados. La segunda es

comparar estadísticamente las detecciones obtenidas mediante el modelo y las logradas con el radar real.

Teniendo en cuenta que la detección radar de un blanco es una sucesión de intentos de detección realizados a intervalos regulares de tiempo, cuya duración depende del propio equipo y del modo operativo en que se le haga trabajar, y que siempre existe una relación directa entre la amplitud de los mismos y la distancia recorrida por el blanco en ese tiempo, hemos de introducir el factor tiempo en nuestro modelo si queremos que se aproxime a la realidad.

Hasta ahora, el modelo formulado representa la posible detección de un blanco en una vuelta de antena, y en consecuencia habremos de repetir el proceso a intervalos regulares para simular los sucesivos giros de la misma. Idealmente, la amplitud de esos intervalos ha de ser la propia del radar simulado; no obstante, puede no ser necesario llegar a tal grado de exactitud, siendo suficiente dar a esa amplitud un valor tal que la distancia recorrida por un blanco en ese tiempo sea aceptable para los fines propuestos. Cualquiera que sea la solución adoptada, habrá que tenerla en cuenta a la hora de probar la validez del modelo, ya que, obviamente, los resultados de la simulación variarán en función de la elección realizada.

Diseño de experimentos

Con la introducción de variables aleatorias en una simulación, las variables utilizadas para medir el comportamiento del modelo quedan como variables aleatorias. Esto obliga a tener muy en cuenta el problema de evaluar el significado de los resultados. Los valores medidos no son más que una muestra y deben ser utilizados para estimar los parámetros de la distribución de que se toman.

Por lo general, un estudio de simulación se plantea como una serie de resultados a partir de los cuales se pretende llegar al conocimiento del sistema simulado. Para ello es conveniente diseñar una serie de experimentos que satisfagan los objetivos del estudio. Si esos experimentos están bien planeados, el análisis habrá evitado uno de los fallos más corrientes en simulación, la obtención de una masa enorme de resultados cuya interpretación desborda al analista y, en definitiva, impiden lograr los objetivos señalados. Por tanto, en todo estudio bien planeado debe figurar un conjunto bien definido de preguntas a las que el analista tendrá que dar respuesta mediante una serie de experimentos que él mismo establecerá.

Ejecución de la simulación

Comprobada la validez del modelo, y teniendo diseñados los experimentos a que ha de ser sometido para que dé respuesta a las preguntas que causaron la simulación, sólo resta la realización de éstos para dar por finalizado el proceso.

El calculador en la simulación.

La enorme rapidez de cálculo, del orden de los nanosegundos, de los modernos calculadores digitales, unida a su potente capacidad de memoria que permite el almacenamiento de gran cantidad de datos para su oportuna utilización, ha hecho que hoy en día la simulación los utilice cada vez más.

Normalmente, el tiempo simulado no está en relación con el tiempo requerido para realizar los cálculos, ni tiene por qué coincidir con el tiempo real que transcurre entre dos eventos, en el sistema que se simula. Sin embargo, en algunos casos surge la necesidad de que el modelo procese una determinada información y nos devuelva los resultados con unas restricciones de tiempo muy fuertes de manera que puedan influir en el mismo proceso que los ha originado. El tiempo máximo varía con cada sistema en particular; así, puede ser de milisegundos si se ha de registrar la traza de un radar; de segundos, en el caso de algunas aplicaciones bancarias; decenas de segundos para el control de almacenes y hasta de minutos en algunos sistemas de control de procesos.

En general, de aquellos sistemas que para su realización requieren una fuerte restricción de tiempo, se dice que trabajan en “tiempo útil”, y en el caso particular de que la restricción alcance el valor que realmente existe en el sistema simulado, se dice que actúan en “tiempo real”.

La simulación de sistemas que tengan condicionada la validez al hecho de que su ejecución se realice en tiempo real, esto es, que el modelo simule los fenómenos que ocurren en el sistema en los mismos intervalos que en éste se producen, hace necesario, en la mayoría de los casos, la utilización de calculadores digitales.

Si la simulación incluyó el uso de un computador digital, una vez establecido el modelo representativo del sistema simulado hay que proceder al diseño de un programa que interprete dicho modelo. Este diseño puede ser una tarea difícil y por tanto demorosa, pero el modelo siempre será de gran ayuda por cuanto representa unas especificaciones de qué debe hacer el programa. En la práctica la dificultad de programar un modelo es, con frecuencia, función de la forma en que éste ha sido construido. Desde luego, la validación del modelo habrá de hacerse sobre el programa que lo represente y no sobre el mismo modelo.

Evidentemente, cualquier programa de simulación puede escribirse con los lenguajes de propósito general usados corrientemente, ya sean Fortran, Algol, APL, u otros. A pesar de esto hay razones que hacen aconsejable la utilización de alguno de los lenguajes de simulación existentes.

Por un lado, los lenguajes de uso general no están orientados a la simulación en concreto ni contienen proposiciones de lenguaje adecuadas para la formulación de soluciones a los problemas característicos de la misma; así, no contienen indicaciones del tiempo simulado, lo que hace más difícil la dinamización del modelo, ni están enfocados al estudio de sistemas estocásticos.

Finalmente, no es sencilla la introducción de pequeñas modificaciones en el modelo ya que no están pensados para este fin. Por otro, dado que la estructura de los problemas de simulación es siempre la misma (elaboración de un modelo y experimentación sobre el mismo), parece aconsejable acudir a un lenguaje que facilite nuestro problema. Para ello, dicho lenguaje deberá disponer de proposiciones sencillas y eficaces para la elaboración del modelo; permitir la representación y reproducción de la dinámica dentro del sistema modelado; contener procedimientos para generar y analizar variables aleatorias y series temporales; proporcionar un mecanismo adecuado para especificar el estado inicial del sistema, etc.

Todo lo dicho ha concluido al diseño de numerosos lenguajes de programación especialmente orientados a la simulación. Por lo general estos lenguajes dan al usuario un conjunto de conceptos de modelado que se utiliza para describir el sistema y un método de

programación que convierte la descripción en un programa que ejecute la simulación liberándolo del esfuerzo que supone una programación detallada. Entre estos lenguajes, los más conocidos son: Dynamo, GPSS, Symscript y CSMP. La decisión de utilizar uno u otro está más relacionada con la naturaleza del problema que con cualquier otra cuestión, ya que todos ellos cumplen las condiciones antes citadas.

Parece no haber duda de que con los lenguajes de simulación puede programarse cualquier tipo de modelo; a pesar de ello, y debido al propio diseño de estos lenguajes, esta programación produce cierto aumento en el tiempo de ejecución, así como un claro desaprovechamiento del espacio de memoria disponible. Por tanto, los medios que requieran que en todo momento se cuente con gran cantidad de datos pueden presentar problemas si se utilizan lenguajes de simulación. En consecuencia, hay casos en los que es aconsejable el uso de lenguajes de programación de propósito general.

Como hemos visto, la aplicación de los calculadores digitales a la simulación ha ampliado enormemente el campo de ésta, al mismo tiempo que ha posibilitado la resolución de algunos problemas, que como en el caso del "tiempo real", tienen una muy difícil solución por otro método. La dificultad añadida que representa la construcción de un programa representativo del modelo diseñado se ve ampliamente recompensada por las ventajas que lleva consigo. Actualmente es enorme el número de problemas de simulación resueltos mediante el uso de calculadores digitales. Sólo en el campo militar podemos señalar: simuladores de carros, juegos de guerra, simuladores de tiro, de pilotaje de aeronaves, de CIC, de submarinos, de lanzamiento de armas, etc.

Conclusiones

La simulación, como única herramienta para realizar el estudio de sistemas cuyo conocimiento es imposible de otro modo, será siempre necesaria. Existen, además, varias circunstancias que hacen que la simulación sea, tal vez no estrictamente necesaria, pero sí muy aconsejable. Entre ellas puede citarse las siguientes:

- El precio actual de la energía y su previsible aumento, que limita cada vez más la utilización de los sistemas que requieren para su funcionamiento hacer uso de aquella.
- El desgaste del material, que a veces llega a la propia destrucción, imposibilita en muchos casos hacer uso del mismo.
- La ausencia del riesgo en la utilización de simuladores, lo que no siempre es posible lograr trabajando con el sistema real.
- La posibilidad de adiestrar a personal en el uso de sistemas cuya entrada en servicio no se producirá hasta mucho más tarde.

Estas y otras razones han conducido al gran número de simuladores actualmente existentes, y todo parece indicar que la importancia de la simulación será aún mayor en el futuro.

Uno de los factores más importantes a la hora de decidir la simulación de un sistema es su costo económico, y dado que éste puede ser muy elevado es aconsejable proceder a un detenido estudio de los siguientes puntos:

- Utilización que se va a dar a la simulación y, por tanto, conveniencia de ésta.
- Fijación de las especificaciones que determinen los objetivos que ha de cumplir el modelo que se diseñe.

— Establecimiento de las previsibles adecuaciones que la simulación ha de ser capaz de aceptar a lo largo de su vida útil.

— Elaboración de un plan de mantenimiento, fijando el nivel de respetos y el personal que ha de llevarlo a cabo.

— Determinación del tiempo de resolución del proyecto.

A pesar de las innegables ventajas que su empleo implica, la simulación está lejos de constituir una panacea a los numerosos problemas a que se aplica. Principalmente, en el campo del adiestramiento puede ocasionar graves deformaciones debido en gran parte, a la imposibilidad de simular el "factor humano". Es decir, no es posible simular las sensaciones que actúan sobre el utilizador del sistema real, por lo que estas no existen cuando el utilizador se encuentra ante el simulador. Así por ejemplo, un piloto de aeronave es consciente del peligro que corre cuando se encuentra en vuelo, pero esa sensación desaparece si lo que está manejando es su simulador de vuelo. Ello puede acarrear un grave peligro si esa falsa seguridad la mantuviese en el aparato real.

Resumiendo lo hasta ahora dicho, puede afirmarse que la simulación es una gran ayuda en multitud de cuestiones que de otro modo tendrían difícil solución, aun cuando su utilización puede acarrear nuevos problemas; en consecuencia, sólo debe llevarse a cabo después de un detallado estudio que nos haga ver esas posibles deficiencias, con el fin de intentar su corrección.

En el campo militar, lo más valioso que ofrece es que incrementa artificialmente la "experiencia" del combatiente, lo que le ayuda a acertar en la toma de decisiones correctas en futuras situaciones reales, las que a lo mejor nunca le ocurran en toda su carrera.

III. APLICACIONES DE UN SIMULADOR

¿Qué aplicaciones tiene un simulador en una Academia de Guerra Naval?

En la primera parte de este artículo vimos que la simulación, en general, tiene como razón de ser la búsqueda de un factor humano importantísimo en la toma de decisiones e imposible de obtener sin la ayuda del tiempo, cual es la "experiencia".

Si se tuviera que reducir todas las materias que se enseña en la Academia de Guerra a una sola, indudablemente, el título de este ramo único sería Resolución de Problemas. En eso consiste la función de un Oficial especialista en Estado Mayor: resolver problemas considerando aspectos estratégicos, tácticos, logísticos; económicos, sindicales, políticos, etc., toda la gama de factores que influyen en la toma de una buena decisión.

Pero no basta con enseñar las técnicas de resolución de problemas; es necesario practicar, cometer errores, sentirse en la necesidad de resolver apremiados por el tiempo; en una palabra, adquirir la "experiencia", y es aquí donde el simulador entra a jugar su importante papel.

En pocas horas de juego de guerra se puede simular muchas horas de operaciones en la mar, y varios jefes-alumnos podrán tomar decisiones importantísimas sin que en la realidad se arriesgue vidas humanas o material ni se gaste una gota de combustible.

En juegos de doble acción se enfrentarán dos voluntades; si bien es cierto que una de ellas no puede asimilar completamente la mentalidad, usos y costumbres del enemigo, al menos presenta las infinitas respuestas que la mente humana es capaz de generar ante una

situación dada. Sabemos que en la guerra naval no hay limitaciones como en la guerra terrestre, y así se nos abre un horizonte infinito donde jugar la idea "genial".

En la parte final de un juego de guerra, la más importante, cual es la crítica, y donde se obtienen las conclusiones, todos los participantes están guardando en su memoria la experiencia adquirida y ella se constituye en un elemento de juicio muy valioso en situaciones futuras.

El viejo adagio chino: "lo que escucho lo olvido; lo que veo lo recuerdo y lo que hago lo sé", permite tranquilizar la conciencia de un posible Jefe de Estudios que se sienta en la duda de si vale la pena reducir las horas de clase para emplear el tiempo en ejercitar la toma de resoluciones.

Si un alumno escucha en clase a su profesor una conferencia sobre la importancia del factor logístico, y si consideramos válido el adagio, probablemente esa conferencia la olvide. Si ese mismo alumno ordena en el simulador un ataque aéreo desde un portaaviones y sus aviones no alcanzan a regresar y se caen al mar por falta de combustible, no va a olvidar nunca más el incidente vivido en el simulador, donde las pantallas se apagan y las líneas de telecomunicaciones quedan mudas, acusando con el silencio al culpable del error logístico. El programa no perdona ni hace la vista gorda. Lo que hizo ya lo sabe.

Pero veamos qué aplicaciones puede tener un simulador en una Academia de Guerra Naval. En primer lugar, podemos hablar de tres grandes aplicaciones. Por una parte, las aplicaciones didácticas, donde se pretende aplicarlo al proceso enseñanza-aprendizaje; en segundo término, para aplicaciones reales, donde se puede probar la planificación de guerra; la tercera aplicación es emplearlo en la investigación operativa para el estudio específico de procedimientos tácticos, formaciones, armas, etc.

En cuanto a los tipos de juego se puede clasificar en juego de simple acción, donde juega un partido su planificación y la dirección del juego actúa como el adversario; en juegos de doble acción; donde participan dos partidos que se enfrentan entre sí y la dirección del juego actúa como árbitro, y finalmente, juegos de múltiple acción donde participan tres o más partidos con la dirección como árbitro.

Es necesario también clasificar los juegos por niveles, ya sean de nivel político, estratégico, operativo o táctico. Dentro de un nivel operativo, a veces son subclasificados en niveles de FT, GT, UT.

Finalmente, se puede desarrollar juegos específicos en algún tema militar, como por ejemplo, de crisis, de inteligencia, de adquisición de unidades navales, etc., con lo que creemos que se completa el cuadro general.

Es conveniente, por tanto, que en la Directiva inicial se clasifique perfectamente el juego y así facilitar la definición del objetivo y evitar deformaciones posteriores.

Veamos algunos ejemplos:

- Juego didáctico de doble acción, a un nivel operativo y táctico.
- Juego real de comprobación de la planificación de simple acción a nivel estratégico.
- Juego didáctico de crisis a nivel político-estratégico de doble acción.
- Juego de inteligencia de simple acción a nivel estratégico.
- Juego de investigación operativa de simple acción a nivel táctico.
- Juego real de triple acción a nivel estratégico.
- Juego didáctico de doble acción a nivel de fuerza de tarea.

Las aplicaciones de los juegos didácticos, en una Academia de Guerra, pretenden generalmente alcanzar uno de los siguientes objetivos:

1. Familiarizar a los alumnos en el diseño y conducción de Juegos de Guerra.
2. Ejercitar a los alumnos en la toma de decisiones en ambientes de diversos niveles y restringidos por factores relevantes.
3. Ejercitar a los alumnos en la conducción de fuerzas aeronavales muy superiores a las que por su propia graduación militar le corresponde y en el uso de sistemas C³I. (mando, control, comunicaciones e inteligencia).
4. Introducir a los alumnos en las diversas técnicas de Juegos de Guerra.
5. Familiarizar, con visión de futuro, a los alumnos en el manejo de nuevas unidades y armas que se espera poseer.

Los juegos reales desarrollados en una Academia de Guerra no pasan de ser más que una servidumbre, ya que normalmente las Academias son órganos de trabajo del Estado Mayor de la Armada, y éste aprovecha las instalaciones y los Oficiales que trabajan o estudian en ella. El problema o la planificación se estudia o prueba reiterativamente cuantas veces sea necesario, hasta que se encuentra la solución más idónea.

Los juegos de investigación operativa tienen aplicaciones múltiples. Por una parte, tienen importancia didáctica si se considera que una Academia Naval es el más alto instituto de estudios de la Armada, y como tal, sus profesores y alumnos pueden investigar sobre mejores sistemas de armas, mejores maniobras ante una amenaza y experimentar con nuevos procedimientos para mejorar las doctrinas. También se considera una servidumbre si el simulador es empleado en investigación operativa pura al servicio de otros organismos ajenos a la Academia, como puede ser la Dirección de Armamentos, la Oficina de Investigación y Desarrollo de la Armada, Aviación Naval, Escuadra, etc.

Para atender estas servidumbres y sacar el mayor rendimiento posible a la alta inversión que significa el CENTAC; el simulador debe ser usado el mayor tiempo posible en objetivos bien diseñados.

El ideal es que el computador sea usado las 24 horas del día, para lo cual se requiere un mayor número de operadores y de oficiales controladores que permita trabajar en dos o más turnos. Por el momento, si se llegara a saturar la capacidad del sistema en su horario diurno normal, se puede dejar para los horarios nocturnos aquellos trabajos de investigación o análisis que requieran un menor número de operadores y trabajar con los medios de que se dispone.

En cuanto a la calidad y el diseño de los objetivos, es competencia de cada usuario, lo que asegura una amplia libertad para la experimentación de nuevas ideas; sin embargo, la Academia de Guerra Naval tiene el deber de cooperar a que estos objetivos, en el caso particular de las doctrinas, sean concordantes con los lineamientos generales que imparta el Estado Mayor General de la Armada, del cual ella depende.

En el aspecto administrativo, los usuarios deben solicitar oportunamente a la Academia de Guerra (CENTAC) los días y horas que requieran de uso del computador, señalando además los objetivos y otros detalles tales como el área de operaciones, el número de participantes, etc. La Academia debe compatibilizar todos los requerimientos recibidos, tanto del exterior como los propios, y confeccionar el calendario anual, el cual debe ser lo suficientemente flexible para permitir absorber posibles imprevistos o satisfacer servidumbres de otros organismos.

Aunque es difícil evaluar el resultado que el uso del CENTAC va a producir en la capacitación de las nuevas promociones de Oficiales que egresen de la Academia, ya no cabe la menor duda que su empleo permite integrar las distintas asignaturas profesionales que en ella se imparten y entregar a los participantes experiencia personal en la planificación y conducción de operaciones navales.

