

Método estadístico factorial a dos niveles aplicado en los experimentos de explotación de los Simuladores.

P. Moreno Quintana, J. Villar Cociña.

CID, Centro de Investigación y Desarrollo No.2, UIM, MINFAR.
Plaza de la Revolución, Ciudad Habana.
Telef: 8815435, ext.112.

(Recibido el 10 de Febrero del 2002, aceptado 3 de Mayo del 2002)

Resumen.

La introducción de los simuladores en el proceso de instrucción en el país cuenta con una dificultad al no conocerse el real impacto de este tipo de equipamiento en la adquisición de las habilidades dentro del proceso de entrenamiento a que va dirigido.

El empleo del método estadístico factorial a dos niveles permite la obtención de un modelo lineal de respuesta de la eficiencia, o calificación, en función de la forma cuantitativa de empleo de los diversos medios de entrenamiento y sus combinaciones.

Este modelo es validado con un nivel de confianza calculado y puede ser optimizado por los métodos matemáticos correspondientes. Para esto se realiza un grupo de recomendaciones en la organización de los experimentos que han sido obtenidos durante la aplicación de este método en diversas ocasiones.

Palabras claves: Simuladores, modelación matemática, diseño de experimentos.

1. Introducción.

Durante el proceso de investigación y desarrollo de los simuladores se presenta el problema de validar los resultados teóricos que se tienen en cuanto al impacto real del equipo desarrollado (simulador) en la adquisición de habilidades y conocimientos.

Esta valoración permite la obtención de datos que permitirán la adopción de la variante de entrenamiento más adecuada, partiendo de que se deben conjugar cuantitativamente los diferentes métodos y medios de entrenamiento que se poseen y conociendo que se va a insertar un nuevo medio.

Por ejemplo, en el entrenamiento del tiro con armas de infantería se emplean diversos medios de entrenamiento, algunos son:

- Barra de puntería. (b_p)
- Banco de triangulación (b_t)
- Tiro con fusiles neumáticos (f_n)
- Tiro con fusiles de calibre reducido (f_{cr})
- Tiro con fusiles de calibre de combate (f_{cc})
- Tiro en el simulador de tiro (f_{st})

Se puede prever entonces que la calificación (η) que obtendrán los tiradores podrá ser modelada a través de una función de la siguiente forma:

$$\eta = f(b_p, b_t, f_n, f_{cr}, f_{cc}, f_{st})$$

Este modelo puede ser lineal, cuadrático, cúbico, polinomial, etcétera. Sin embargo en el caso de los experimentos de aplicación de simuladores se puede afirmar con certeza que la curva de asimilación del equipo se puede construir con tres rectas (curvas A, B y C, fig. 1) que describen con un nivel aceptable de error la curva exponencial que la caracteriza, por lo que utilizaremos un modelo lineal de respuesta. La primera zona es llamada zona de incertidumbre (Curva A), el número de repeticiones es bajo y los resultados son muy variables entre un individuo y otro y se caracteriza por un elevado crecimiento de las habilidades adquiridas en pocas repeticiones, asociados fundamentalmente al reconocimiento del equipo y adquisición de habilidades primarias.

La segunda etapa se caracteriza por un crecimiento lineal más estable (Curva B), con una pendiente menos brusca y de una dispersión menor de los resultados de los grupos muestrales. Esta zona es llamada zona lineal.

La última de las zonas localizadas es la llamada zona de saturación (Curva C) y se caracteriza por una pendiente muy baja y un crecimiento muy lento de los resultados aun con incrementos notables del número de repeticiones.

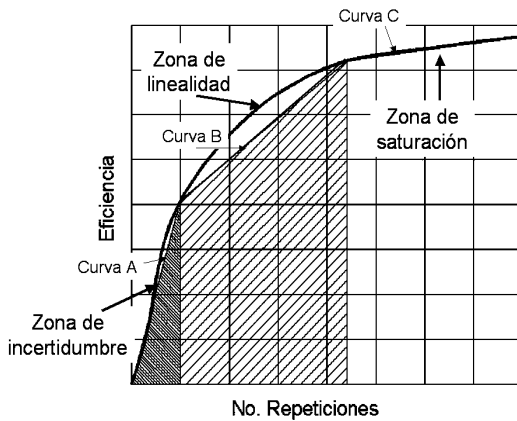


Fig. 1 Curvas de asimilación.

La introducción de los simuladores de tiro debe modificar el método de preparación de los tiradores, pero:

¿Cuál es la real influencia en los resultados de este medio?

¿Cuál será la "dosis" o número de repeticiones que se deben realizar por cada uno de los medios descritos para lograr los resultados óptimos?

¿Cuál es el método de combinación de los medios más económicos?

¿Deben mantenerse todos los medios de entrenamiento al insertar el nuevo equipamiento?

Estas y otras preguntas deben ser contestadas antes de decidir la inversión en algún medio de entrenamiento a gran escala y de emprender la realización de los ajustes correspondientes de los planes de preparación.

Es por tanto de sumo interés desarrollar una metodología capaz de modelar el impacto de la acción combinada de los diferentes medios de preparación sobre el sujeto de entrenamiento (SE). Las decisiones de inversión, asociadas a los problemas económico financieros serán tratadas en otro momento.

En este trabajo se realiza una propuesta de método para la obtención de un modelo lineal que evalúe el impacto real de cada medio de entrenamiento que se emplea y su acción combinada sobre el SE al introducir los simuladores como medio de entrenamiento en un programa ya establecido.

2. El método factorial a dos niveles.

2.1. Generalidades.

Es común en la práctica de la experimentación la situación en que se debe conocer la influencia de varios factores sobre un resultado determinado, (como es típico en el caso de las investigaciones sobre el impacto de los simuladores en el proceso de entrenamiento), como puede verse en el ejemplo anterior.

Uno de los métodos más comúnmente empleado es el método factorial a dos niveles

La esencia o el objetivo del método estadístico factorial a dos niveles consiste en obtener un modelo matemático, o ecuación, que describa el proceso que se experimenta mediante la obtención de un polinomio lineal de la forma:

$$\eta = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_1x_2 + \dots \quad [1]$$

Donde:

x_i Son las variables independientes del experimento.

b_i Son los coeficientes del polinomio lineal.

η Resultado del proceso.

La obtención del modelo matemático permitirá la optimización del proceso desde el punto de vista de los resultados medidos η (se recomienda la programación lineal de Dantzig por el método Simplex, utilizando como restricciones los niveles dentro de los cuales es válido el modelo) y, en cualquier caso, la predicción de los resultados cuando se realiza una combinación de las variables independientes aunque no sea la solución óptima y se desean considerar alternativas.

El valor de los coeficientes del polinomio proporciona una valoración cuantitativa de la real influencia en los resultados del proceso que produce el cambio de valor de una variable independiente o de una combinación de variables.

Las bases del modelo parten del establecimiento de determinados niveles o valores límites de las variables independientes (un nivel máximo y un nivel mínimo), dentro de los cuales el modelo a obtener es válido, con un nivel de precisión predeterminado.

Este método de obtención del modelo matemático de comportamiento del proceso tiene algunas limitaciones, dentro de las que se encuentran:

- 1 El modelo obtenido es válido solo dentro de los intervalos en que se fijan las variables, cualquier extrapolación es matemáticamente injustificada.
2. Es necesario tener determinada experiencia en el proceso que se evalúa, la elección de los intervalos de medición o niveles de las variables independientes es un factor clave en la precisión

del modelo, la elección de intervalos muy pequeños no dará información apreciable o superior al error calculado del modelo, por lo que no será de interés; la adopción de intervalos demasiado grandes provocará que la posibilidad de que el comportamiento del modelo se asuma lineal, y sin embargo no lo sea en un intervalo tan amplio, introduciendo errores importantes en el modelo.

Sin embargo es un método relativamente económico y con un nivel de precisión calculado, que para estudios de impacto de simuladores, es recomendable su empleo por los siguientes aspectos:

- 1 Se limita el número de “variantes experimentales” (número de experimentos necesarios de realizar con combinaciones de variables a distintos niveles) no siendo necesario realizar todas las combinaciones posibles para obtener un modelo válido.
 - 2 Es posible eliminar de antemano parámetros de interacciones de tercer o mayor orden limitando la cantidad de experimentos a realizar, contando con el criterio estadístico de la baja probabilidad de significación de interacciones de tercer orden o superiores, por lo que se desechan del cálculo.
 - 3 Se obtiene un modelo que es válido para un amplio grupo de interacciones de los diferentes factores.
 - 4 Es posible la inclusión de parámetros cualitativos (de dos valores, por ejemplo: empleo o no de proyectiles trazadores en el tiro de precisión) en el modelo y observar su influencia en un parámetro de salida cuantitativo.
 - 5 Es posible la obtención de modelos aun más económicos en el área experimental, al realizar modelos factoriales a dos niveles fraccionarios.
- 2.2. Recomendaciones para su empleo en la evaluación del impacto en la introducción de simuladores en los procesos de instrucción y adiestramiento.**
1. Se debe diseñar un sistema de evaluación que sea capaz de determinar con un nivel aceptable de precisión la diferenciación de los resultados entre los medios de entrenamiento utilizados. Usualmente existe un método de evaluación de las habilidades adquiridas durante el entrenamiento que se encuentra en explotación. Este método es diseñado, por lo general, para un empleo masivo en condiciones de campo y no es (según la experiencia) adecuado para los propósitos de investigación; es necesaria entonces una revisión crítica de las potencialidades del método existente, su evaluación, y en caso necesario, proponer un nuevo método que se adapte a las necesidades. Debe tomarse en cuenta que la realización de un experimento de esta clase es costoso, tanto en recursos materiales, financieros y humanos, por lo que debe prestarse cuidado durante la fase de diseño.
 2. Los simuladores que en la actualidad se están empleando en el país se clasifican del tipo perceptual motor (clasificación que implica la coordinación de un individuo o grupo de individuos y de un sistema a partir de las entradas (tareas de búsqueda, monitoreo, detección e identificación) y sus salidas (movimientos físicos del individuo o del grupo). [13], por lo que la curva de adquisición de estas habilidades en función del número de repeticiones es exponencial [6]. Se debe, en una primera etapa, proponer un intervalo de experimentación donde se espere que la existencia de la zona lineal, que es la zona más recomendable de empleo del simulador para maximizar la relación costo-beneficio del equipamiento. En un estudio posterior se realizará la búsqueda de la saturación del nuevo medio y de esta forma caracterizarlo completamente y conocer sus potencialidades.
 3. No deben utilizarse muestras o grupos muestrales inferiores a 20 individuos, lo que permitirá trabajar directamente con estadígrafos insesgados.
 4. Se debe garantizar la homogeneidad de la muestra, para esto se debe determinar con antelación los parámetros sociológicos, psicológicos y de capacidad motora que influyen en los resultados; determinar los niveles aceptables y realizar encuestas de discriminación, eliminando los individuos que no clasifiquen con los niveles establecidos.
 5. Las diferencias entre los diversos métodos de entrenamiento en verificación se podrán comparar con los resultados de un grupo patrón o de prueba, el cual se someterá al método tradicional de entrenamiento y se le harán las pruebas finales diseñadas para los grupos experimentales. Las comparaciones entre los resultados de los diversos grupos y su nivel de significación se podrá realizar a través de la prueba de hipótesis de Chi-cuadrado.
 6. El personal que dirigirá el proceso de instrucción y la instrucción en sí misma debe ser preparado de antemano de forma simultánea, garantizando un nivel uniforme de dominio del equipamiento a emplear por parte de los instructores.
 7. Se deben obtener, al menos, tres valores en cada variante experimental para poder garantizar un muestreo con niveles de error calculado aceptables.

2.3. Metodología de experimentación y procesamiento.

El número de variantes experimentales a realizar en el experimento depende del número de variables independientes del proceso en estudio o dicho de otra forma, del número de factores que influyen en el mismo. Como en este método los factores se estudian en dos niveles, alto y bajo, el número de combinaciones posibles de dichos factores es 2^n , donde 2 es el número de niveles y n es el total de factores o variables independientes.

De esta forma se conforman 2^n experimentos a realizar, asignando los valores a las variables independientes (niveles alto y bajo para cada una de ellas) y registrando los resultados del valor de la variable dependiente durante el proceso de experimentación.

Resulta conveniente realizar varias repeticiones de cada corrida para lograr una mayor confiabilidad en los resultados obtenidos, puesto que de cada corrida se toma solo el valor promedio y será necesario validar el valor promedio de las variantes experimentales a través de la prueba de hipótesis de Student o Fisher lo que le dará más rigor a la aceptabilidad de los datos promediados en función del número de repeticiones a partir del criterio de aceptación.

El método estadístico factorial a dos niveles permite determinar con elevada certeza los factores o interrelaciones del proceso cuyo aporte es sustancial a los resultados del proceso, así como también los menos significativos. Dicho en otras palabras, para los simuladores resulta de interés valorar cuantitativamente un sistema de entrenamiento determinado desde el punto de vista del aporte que realiza cada uno de los elementos del mismo en la formación de hábitos y habilidades. Por ejemplo: en el caso del entrenamiento del tiro desde tanques, el sistema de entrenamiento está formado por el entrenador con calibre reducido, el simulador de tiro desde tanques (SimTTQ) y el tiro con calibre de combate. Resulta necesario poder evaluar que aporta cada uno de ellos para lograr la eficacia deseada en el tiro con el armamento del tanque.

Uno de los métodos más confiables para determinar la significación o importancia de cada uno de los coeficientes del polinomio [1] obtenidos por el procedimiento descrito una vez culminado el procedimiento experimental y procesados los datos resultantes, es el método de Fisher.

Los coeficientes del polinomio que no cumplan con la condición de aceptación que este método propone son eliminados, por lo que (de hecho) se procede a una simplificación del polinomio, dejando sólo los términos significativos.

A continuación se debe realizar la prueba de adecuación del modelo matemático y para ello puede

utilizarse el criterio de Fisher basado en la comparación de las varianzas de los dos tipos de error que tienen lugar y que son: uno de ellos el denominado efecto de *error puro* por las fluctuaciones debido al proceso en condiciones estacionarias, y el otro error, denominado *error de falta de ajuste* de nuestro modelo con la realidad del proceso.

3. El simulador de tiro con armas de infantería.

En este caso era necesario determinar la influencia real de los medios de entrenamiento tradicionales y su interacción con un nuevo método: el simulador de tiro con armas de infantería [14].

De trabajos anteriores se conoce la influencia real de los dos primeros elementos de entrenamiento (barra de puntería y banco de triangulación) y estos se emplearon en las dosis recomendadas en todos los casos, por lo que no se tomaron en cuenta en el análisis del diseño del sistema de entrenamiento que se debía proponer.

Este experimento fue concebido con un diseño factorial a dos niveles, con tres variables independientes y se definió el parámetro Eficiencia del Tiro (η_i) como el resultado del proceso de entrenamiento.

Este parámetro de salida es el producto de la calificación obtenida en el cumplimiento de un ejercicio determinado por el inverso de la puntuación máxima posible en ese ejercicio en específico.

Las tres variables de control o independientes fueron:

5. Volumen de disparos realizados en armamento de calibre reducido.
5. Volumen de disparos realizados en armamento con calibre de combate.
5. Volumen de disparos realizados en el simulador de tiro.

Entonces el modelo que se desea obtener es el siguiente:

$$\eta_i = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 \quad [1]$$

Donde:

- x_1 Valor de la variable "tiro con calibre reducido."
- x_2 Valor de la variable "tiro con calibre de combate."
- x_3 Valor de la variable "tiro con simulador."
- b_i Son los coeficientes del polinomio lineal.
- η_i Resultado del proceso (eficiencia del tiro).

Los niveles de variación de las tres variables se muestran en la siguiente tabla:

Variable de control	Nivel Alto	Nivel Bajo
Volumen de calibre reducido.	170	0
Volumen de calibre de combate	38	0
Volumen de empleo del simulador	170	38

Para conocer el comportamiento del desarrollo de un entrenamiento con el programa actual de preparación, se incorporó un grupo de control que entrenaría por el método convencional y que sería monitoreado con la misma intensidad que a los grupos del experimento.

Se tomó la decisión de utilizar como polígono de pruebas un concentrado de nuevos soldados y se coordinó la supervisión por un grupo experto independiente para la validación y coordinación general del plan de investigación.

Acorde a la metodología expuesta se conformaron cinco grupos organizados en pelotones de 25 integrantes, que fueron sometidos al entrenamiento según el patrón específico diseñado.

La igualdad de las condiciones iniciales de preparación y de conocimientos y habilidades en la realización del tiro, se verificó a través de una encuesta aplicada a todos los participantes en el experimento, donde se interrogaba acerca de los siguientes parámetros:

- Nivel escolar actual.
- Nivel de preparación en instrucción del tiro.
- Experiencia previa en el tiro con armamento de calibre reducido.
- Experiencia previa en el tiro con armamento de calibre de combate.

El procesamiento estadístico de los resultados arroja una homogeneidad de los valores medios y su dispersión en todas las variables, con un 95 % de significación.

Para impartir la instrucción se utilizaron seis instructores de tiro que operaban los medios de entrenamiento descrito, y se encontraban fijos en sus áreas de entrenamiento y un miembro del equipo experto independiente sirvió como coordinador del experimento.

Estos recibieron una preparación inicial antes de comenzar el experimento donde se les instruyó en los objetivos de la investigación y recibieron una explicación del procedimiento.

El control de la preparación final (η_t) se realizó a través del análisis comparativo de los resultados del ejercicio de tiro complejo, que incluye elementos tácticos y de tiro de precisión (que se realiza al terminar la etapa de preparación de los soldados), al cual se le hicieron modificaciones en su etapa de ejecución para aumentar el rigor del mismo y se diseñó un sistema de calificación más preciso que el empleado normalmente.

Este ejercicio fue cumplido por los cinco pelotones el mismo día, con el mismo armamento y en el mismo campo de tiro y fue controlado por una comisión de expertos no asociados a los resultados del mismo.

El procesamiento de los resultados experimentales arrojó los siguientes resultados:

1. El valor de los coeficientes b_1 , b_{12} y b_{13} no son significativos (según el criterio de Fisher), por lo que la influencia del tiro con calibre reducido en la preparación para el tiro, al menos en este rango de trabajo, no es significativo y se pueden eliminar del plan de preparación.
2. El valor del coeficiente b_0 es prácticamente cero, lo que podría implicar que los fundamentos de la preparación para el tiro se reciben durante el programa de tiro que se imparte.
3. Los valores de los coeficientes b_2 y b_3 son positivos y con valores muy próximos, lo que implica que ambos medios de entrenamiento tienen igual peso (dentro de sus rangos) en los resultados finales del tiro en función con el número de repeticiones que se le planifican.
4. El valor del coeficiente b_{23} es relativamente alto, lo que (a nuestro juicio) habla de la importancia relativa de la combinación de ambos medios con vistas a elevar la efectividad de los resultados del tiro.
5. El valor de la pendiente que se logra al maximizar y minimizar los valores del polinomio obtenido, nos hacen pensar que el empleo en combinación de estos medios no se encuentra aún en la zona de linealidad, por lo que es posible elevar un poco la carga y obtener resultados superiores de los coeficientes o podríamos repetir el experimento hasta encontrar el punto de saturación de esta combinación.
6. Los resultados obtenidos en cuanto a la eficiencia del tiro (calidad de la instrucción) son satisfactorios aún en la variante mínima (dentro del los límites del modelo calculado) de empleo del simulador y del tiro con calibre de combate, lo que permite la adopción de cualquier variante en función de las necesidades y posibilidades de recursos y de tiempo que se posea en cada caso en específico, incluyendo el entrenamiento solamente con el empleo del simulador.

4. Conclusiones.

La introducción de simuladores basados en computadoras en el proceso docente de los sistemas de enseñanza y entrenamiento es un hecho real. Sin embargo la carencia de un método de evaluación del impacto con el empleo de estos medios en el proceso de instrucción impide la correcta introducción de los mismos.

En el presente trabajo se expone un método de modelación del impacto de los diferentes medios de enseñanza en la adquisición de habilidades del tipo perceptual motor, basado en el empleo del método

factorial a dos niveles. Este método se ha aplicado con efectividad en el desarrollo de Simuladores diferentes y los resultados han sido validados por comisiones del Ministerio de las Fuerzas Armadas de Cuba. Por otro lado, se plantea un grupo de recomendaciones acerca de la organización de los experimentos y de los métodos matemáticos de optimización de los resultados.

5. Bibliografía.

1. Hoel, Paul G. "Estadística elemental", Editorial Pueblo y educación, Ciudad de la Habana, 1971.
2. Mills, Frederick Cecil, "Métodos estadísticos", Aguilar SA, España, 1970.
3. Colectivo de autores, "Metodología de la investigación", MES, Cuba, 1983.
4. Cárdenas Garnier, Miguel Angel. "Evaluación y prueba de automóviles", MES, Cuba, 1985.
5. Van der Pal, Jelke. "Enhance war fighter's skill", Modern Simulation and Training, No. 5, 1999.
6. Wolff, Ron. "Life fire testing and training", Modern Simulation and Training, No. 5, 1999.
7. Utterstrom, Jan. "Beyond the computer based training". Modern Simulation and Training, No. 2, 1999.
8. Buchanan, Nancy. "Multirole military simulators". Modern Simulation and Training, No. 1, 1999.
9. Gronto, Kjell. "Acelerated learning". Modern Simulation and Training, No. 6, 1999.
10. Hubbel, Robert C. "Advanced learning environments". Modern Simulation and Training, No. 5, 1999.
11. Wallace, Phillips. "A training task analysis". Modern Simulation and Training, No. 4, 1999.
12. Krug, Randy. "Low cost high payoff training device". Modern Simulation and Training, No. 5, 1999.
13. Farmer, Erick. Handbook of simulator based training. Ashgate, Brookfield, USA. 1999.
14. Cancio Monteagudo, J. SimTiro. Simulador de armas de infantería empleando técnicas de realidad virtual. Informe presentado a la Academia de Ciencias de Cuba para optar por Premio Nacional del Trabajo Científico. 1998.

Two levels factorial statistical method applied in experiments of Simulators operation.

Abstract.

The introduction of simulators in the country's instruction process deals with the difficulty of not knowing the real impact of this equipment in the acquisition of abilities within the training process. The use of the factorial statistical method at two levels allows the obtaining of a linear model with answer about efficiency or qualification based on the quantitative form of use of diverse means of training and its combinations. This model is validated with a calculated level of confidence and can be optimized by the corresponding mathematical methods. For this a group of recommendations is made in the organization of experiments that have been obtained during the application of this method in diverse combinations.

Key words: Simulators, mathematical modelation, experiment design.