

# El diseño de experimentos como herramienta para la mejora de los procesos. Aplicación de la metodología al caso de una catapulta

Design of Experiments as a Tool for Process Improvement.  
Methodology Applied to a Catapult

LAURA ILZARBE IZQUIERDO

Ingeniera Industrial de la Universidad de Navarra. Doctora en Ingeniería de la Technische Universität Berlin. Profesora de Gestión de Calidad en el Departamento de Organización Industrial de Tecnun, Escuela Superior de Ingenieros de la Universidad de Navarra.  
lilzarbe@tecnun.es

MARTÍN TANCO

Ingeniero Industrial de la Universidad de Montevideo (Uruguay). Doctorando del Departamento de Organización Industrial de Tecnun, Escuela Superior de Ingenieros de la Universidad de Navarra.  
mtanco@tecnun.es

ELISABETH VILES

Licenciada en Matemáticas por la Universidad de Zaragoza. Doctora en Ciencia Físicas por la Universidad de Navarra, profesora de Métodos Estadísticos en el Departamento de Organización Industrial de Tecnun, Escuela Superior de Ingenieros de la Universidad de Navarra.  
eviles@tecnun.es

MARÍA JESÚS ÁLVAREZ SÁNCHEZ-ARJONA

Doctora en Ingeniería Agrónoma de la Universidad Politécnica de Madrid. Profesora de Métodos Cuantitativos en el Departamento de Organización Industrial de Tecnun, Escuela Superior de Ingenieros de la Universidad de Navarra  
mjalvarez@tecnun.es

Clasificación del artículo: reflexión

Fecha de recepción: 11 de septiembre de 2006

Fecha de aceptación: 30 de abril de 2007

**Palabras clave:** planificación de experimentos, metodología para el diseño de experimentos, catapulta, mejora de procesos

**Keywords:** Planning of experiments, methodology for design of experiments, catapult, process improvements.

**RESUMEN**

Con este artículo se pretende resaltar la planificación de la investigación como parte importante en el desarrollo de un diseño de experimentos; para ello se muestra una metodología para la aplicación práctica de esta clase de diseños. El procedimiento recomendable para llevarlo a cabo se presenta de forma teórica y, paralelamente, es aplicado al caso práctico de mejorar el alcance del tiro de una catapulta.

**ABSTRACT**

This article tries to emphasize in research planning like a basic part of experiments design. Therefore, it offers a method to apply the design of experiments. First we show the recommended methodology to follow, theoretically; after, it is applied in the practice to a design of experiment to improve a catapults shot.

\* \* \*

**1. Introducción**

El diseño de experimentos (DOE) es una técnica que consiste en realizar una serie de experimentos en los que se inducen cambios deliberados en las variables de un proceso, de manera que es posible observar e identificar las causas de los cambios en la respuesta de salida [1]. Con esta técnica se puede conseguir, por ejemplo, mejorar el rendimiento de un proceso y reducir su variabilidad o los costos de producción. Su aplicación en la industria comprende campos como la Química [2-5], la Mecánica [6-9], los materiales [10-13], la Ingeniería Industrial [14-17] o la Electrónica [18, 19].

A pesar de que el DOE se define como una herramienta eficaz para mejorar y optimizar procesos y productos, su aplicación no es muy habitual en las industrias. Los ingenieros utilizan limitadamente las técnicas estadísticas avanzadas para solucionar sus problemas, pues están condicionados por no tener conocimientos estadísticos [20-28]. En consecuencia, es objeto de este artículo mostrar, de una manera sencilla, la metodología que sería recomendable seguir para llevar a cabo un DOE.

La mayoría de los artículos científicos publicados sobre DOE se han enfocado en modelos, criterios y otros temas que se refieren casi exclusivamente a la etapa de elección del modelo o diseño para efectuar el experimento y el análisis de datos. Por el contrario, este artículo se centra en explicar, en forma teórica, la importancia de los pasos necesarios para la experimentación, en qué consiste cada

uno y su aplicación al caso práctico de mejorar el lanzamiento de una pelota con una catapulta.

La utilización de este prototipo no es una idea original. La catapulta empleada en un artículo de Anthony [29] junto con el helicóptero de Box [30] son los ejemplos didácticos más utilizados en temas de calidad y estadística.

El artículo se estructura de la siguiente manera: primero se muestra una reseña histórica sobre la técnica del diseño de experimentos; a continuación, se presenta la catapulta objeto de la aplicación práctica; en seguida se describen, teóricamente y aplicadas al ejemplo de la catapulta, las etapas recomendadas para aplicar un diseño de experimentos. Finalmente, se muestran las conclusiones del artículo.

**2. Reseña histórica del diseño de experimentos**

El diseño de experimentos fue aplicado por primera vez por R. A. Fisher en Inglaterra en los años veinte en el campo de la agricultura; sus experiencias le llevaron a publicar en 1935 su libro *Design of Experiments* [31]. Desde entonces, varios investigadores han contribuido al desarrollo y aplicación de la técnica en diferentes campos.

Montgomery [1] considera que ha habido cuatro etapas en el desarrollo del diseño de experimentos. La primera etapa –iniciada en la década del veinte por Fisher– se caracteriza por la introducción sistemática del pensamiento científico y la aplicación del

diseño factorial completo y fraccionado y el análisis de varianza en las investigaciones experimentales científicas. La segunda etapa –iniciada por Box y Wilson [32]– se caracteriza por el desarrollo de la superficie de respuesta (RSM). Estos autores notaron que los experimentos industriales diferían de los de la agricultura en dos aspectos:

- *Inmediatez*, porque la respuesta se puede observar bastante rápido, sin tener que esperar tanto como en la agricultura.
- *Secuencialidad*: el experimentador puede realizar unos pocos experimentos y planificar los siguientes en función de los resultados.

En esta última etapa surgen diseños como:

- Diseños compuestos centrales (CCD).
- Diseños compuestos centrales centrado en las caras (FCD).
- Diseños de Box-Behnken. Durante los siguientes años, la RSM y otras técnicas de diseño se extendieron a la industria química y a los procesos industriales, en especial en las áreas de investigación y desarrollo (I&D).

La tercera etapa comienza a finales de la década del setenta con el creciente interés de las industrias en la mejora de sus procesos. Los trabajos de Taguchi [33, 34] sobre diseño robusto de parámetros (RPD) sirvieron para difundir el interés y el uso del DOE en otras áreas como automoción, industria aeroespacial, electrónica o industria de semiconductores. Aunque los análisis propuestos por Taguchi fueron fuertemente criticados [35-41] por ser ineficientes y en algunos casos poco efectivos, ellos sirvieron para desarrollar el concepto de robustez y extender el empleo del diseño de experimentos a otras áreas, lo que ha dado pie al comienzo de la cuarta etapa del diseño de experimentos en la década del noventa; en ella surgen los diseños óptimos y se han desarrollado numerosas herramientas software para el análisis del DOE.

### 3. Descripción de la catapulta

La metodología para llevar a cabo el experimento se explica a través de un ejercicio práctico que tiene

por objetivo la optimización del lanzamiento de una pelota con un prototipo de catapulta. El prototipo que ha sido utilizado (figura 1) es de madera y consta de una base de la que parten dos brazos. El brazo móvil está sujeto al brazo fijo de la catapulta mediante una goma; éste además contiene en su parte superior una cazoleta que sirve de apoyo para la pelota. Así, al extender el brazo hacia atrás cuantos grados se desee, la pelota sale despedida debido a la fuerza elástica que le transmite la goma al chocar el brazo móvil con el tope (punto negro en la figura).

Este diseño de catapulta permite modificar las posiciones de distintas partes de ella. Por ejemplo, la cazoleta donde irá posicionada la pelota está sujeta al brazo móvil por medio de un tornillo y una tuerca. Esta cazoleta puede estar situada en la posición (+), esto es, la posición actual que se muestra en la figura 1, o se puede desenroscar y colocar en el agujero inferior del brazo móvil, indicado en la figura con el signo (-). Lo mismo sucede con la posición del tope o la extensión de la goma. El ángulo de tiro, sin embargo, puede adoptar cualquier valor.

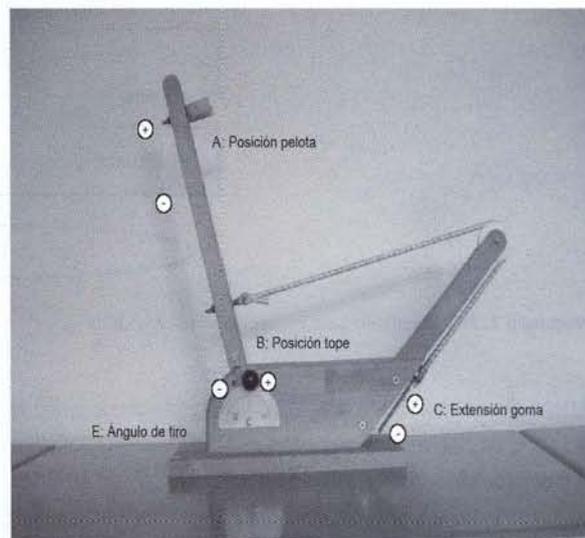


Figura 1. Catapulta

#### 4. Metodología para la aplicación del diseño de experimentos

Un diseño de experimentos implica mucho más que decidir cuáles son las condiciones en las que se realizarán cada uno de los experimentos necesarios para conseguir el objetivo; se deben considerar, además, varias etapas previas y posteriores a la ejecución de tales experimentos. Por esto, Hahn [42] prefiere denominarlo *planificación de la investigación*, pues considera que este término es más amplio que el DOE. Sin embargo, la mayor

parte de la bibliografía mantiene el término antiguo, por lo que en este artículo se continuará usando, aclarando que posee un sentido más amplio que la propia experimentación.

A lo largo de la historia varios autores han clasificado de distintas maneras las etapas necesarias para aplicar el DOE [1, 43-48]. Para el presente artículo se ha decidido seguir la metodología de Montgomery [1], base de muchas otras, que consta de las siete etapas mostradas en el diagrama 1.

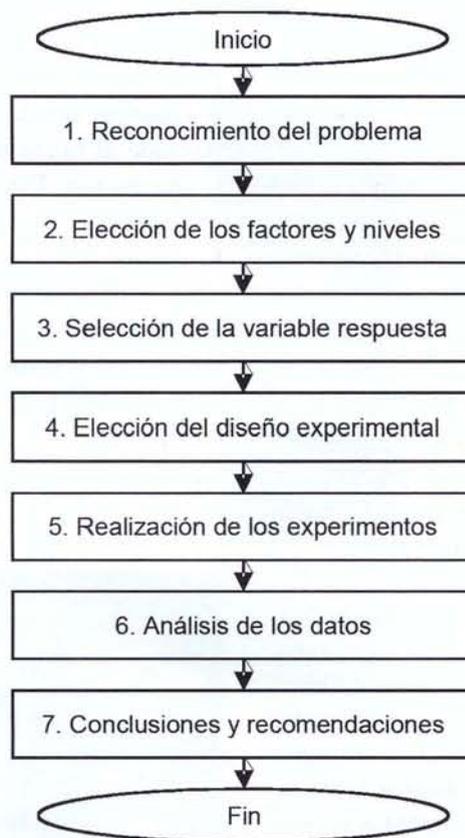


Diagrama 1. Procedimiento para la realización de un DOE

Antes de explicar las etapas necesarias para aplicar el DOE se formulan algunas recomendaciones que el propio Montgomery [1] sugiere tener en cuenta durante todo el proceso de la experimentación:

- *Utilizar los conocimientos previos sobre el problema:* el conocimiento del proceso adquiere

una importancia significativa en cada una de las etapas del diseño.

- *Mantener el diseño y el análisis lo más sencillo posible:* si se realizan correctamente los pasos establecidos para el diseño del experimento se obtendrá un diseño sencillo que, en general,

conduce a un análisis sencillo y más fácil de interpretar.

- *Entender la diferencia entre estadísticamente significativo y significativo en la práctica:* aunque las nuevas condiciones produzcan mejores resultados, esto no significa que en la práctica sean aplicables. Algunas veces suele suceder que modificar las condiciones de operación de una variable resulta más caro que las ventajas obtenidas con el cambio.
- *Recordar que los experimentos son iterativos:* generalmente, al principio de toda experimentación no se posee la información suficiente para realizar un análisis completamente correcto. Por eso se recomienda no invertir más del 25-40% del presupuesto en los primeros experimentos.

Para comprender mejor cada una de las etapas de la metodología, éstas serán descritas en detalle, junto con algunos consejos que puedan ayudar a llevarlas a cabo. Simultáneamente con la descripción las etapas serán ejecutadas en el ejemplo práctico con la catapulta.

#### 4.1. Reconocimiento del problema

El primer paso para realizar un DOE es reconocer el problema. Se entiende como problema tanto una situación no deseable en la que algo está funcionando mal, como una situación que trabaja correctamente, pero que se desea mejorar. La formulación del problema debe ser una descripción concisa y centrada en *aquello que está mal* [49]; siempre que sea posible, será conveniente cuantificar el problema en términos de costo, pues esto permitirá cuantificar la mejora conseguida al final del proceso.

En el ejemplo práctico de este artículo se desea conocer el funcionamiento de la catapulta, es decir, averiguar en qué forma influyen cada una de sus partes en la distancia de lanzamiento, con el objetivo final de configurar una catapulta para que su alcance sea máximo.

#### 4.2. Elección de los factores y niveles

El paso siguiente consiste en proponer cuáles son los factores que se intuye que pueden influir en el

problema que se está considerando. El trabajo en equipo es importante en esta etapa, incluyendo en especial a las personas más cercanas al proceso; la técnica del *brainstorming* y el uso de diagramas causa-efecto pueden ayudar a ejecutar esta etapa de manera ordenada y consensuada.

En el caso de la catapulta se consideraron los siguientes factores: (A) posición pelota; (B) posición tope; (C) extensión goma; (D) tipo de pelota; (E) ángulo de tiro, que se pueden visualizar en la figura 1. A este grupo habrá que agregar los factores externos a la catapulta que pueden tener influencia en el problema considerado, por ejemplo: (F) tirador; (G) condiciones climáticas.

Una vez identificados los factores, éstos deben clasificarse en *primarios*, *mantenidos constantes* y *molestos*. Los primeros son los que serán modificados en la experimentación; los segundos son aquellos que podrían tener una influencia en el problema, pero que en el experimento en curso no son de interés, por lo que serán mantenidos constantes a propósito; por último, los terceros son aquellos que, en general, son difíciles de mantener constantes para todas las unidades experimentales y durante todo el proceso, pero que pueden tener efecto en el problema. Para el caso analizado, los factores (A), (B), (C) y (D) fueron clasificados como primarios; (E) y (G) se mantuvieron constantes, y (F) fue clasificado como molesto.

En un diseño de experimentos se evaluará cada factor en condiciones diferentes, llamados *niveles del factor*. En este ejemplo, cada uno de los factores será evaluado en dos niveles, esto es lo recomendado cuando se comienza la experimentación [1], [50]. A cada nivel del factor se le denomina (-) o (+); así, por ejemplo, el nivel (+) del factor A corresponde a lanzar la pelota en la posición mostrada en la figura 1, mientras que su nivel (-) corresponde a lanzar la pelota desde la posición inferior.

#### 4.3. Selección de la variable respuesta

Se llama *respuesta* o variable dependiente a la variable con que se evalúa el problema. En la práctica

esta etapa se suele realizar conjuntamente con la anterior y, en muchos casos, hasta en orden inverso [1]. Lo ideal sería que la respuesta fuera continua, fácil y precisa de medir, aunque es bastante habitual no poder obtener todas estas características simultáneamente [51].

En la práctica, es usual no poder establecer una única respuesta para un problema [1], ya que, por ejemplo, se puede necesitar optimizar dos variables al mismo tiempo. Esto conduce a la realización de experimentos con múltiple respuesta [43] que requieren un análisis especial (ver [52, 53]), aunque las etapas previas son las mismas.

En el caso del problema de optimización de la catapulta, la variable de respuesta ha consistido en medir la distancia ortogonal desde la base de la catapulta hasta el bote de la pelota.

#### 1.4. Elección del diseño experimental

Establecidos los factores y niveles con los que experimenta, es necesario seleccionar las condiciones en las que se deben realizar los experimentos: cantidad de experimentos por realizar, condiciones experimentales para cada experimento y orden en que éstos deben ser realizados. La experiencia y conocimientos teóricos sobre distintos diseños son de gran ayuda en esta etapa; en gran medida, ellos determinan el número de experimentos que se van a realizar.

La elección de un diseño está directamente asociada con un modelo matemático que relaciona la respuesta con los factores analizados. La mayoría de los diseños utilizados (factoriales, ortogonales de Taguchi, Plackett-Burman [54], etc.) suponen un modelo lineal en la respuesta. Si se prevé una no linealidad importante se debe recurrir a diseños que permitan ajustar modelos de orden superior. Diseños de segundo orden como los diseños compuestos centrales (CCD) [55] y diseños de Box-Behnken (BBD) [56], por ejemplo, son muy utilizados en la Metodología de Superficies de Respuestas (RSM), en zonas cercanas al óptimo. Por último, se debe mencionar que si se conoce que la relación existente

no es polinómica, el diseño y análisis debe acomodar esta no linealidad realizando transformaciones en la función de respuesta<sup>1</sup>.

Una vez seleccionado el diseño, el número mínimo de experimentos necesarios estará determinado. También se deben analizar con cuidado los tres principios básicos para el diseño del experimento: obtención de réplicas, aleatoriedad y análisis por bloques; estos principios son condiciones fundamentales pues permiten reducir el efecto de las variaciones introducidas por los factores molestos y los desconocidos<sup>2</sup>.

En el ejemplo, la realización del experimento se llevó a cabo con un diseño *factorial completo*, que consiste en realizar un experimento en cada una de las posibles combinaciones entre los niveles de cada factor primario (A, B, C, D). En general, los diseños factoriales son los más eficientes para estudiar el efecto producido por dos o más factores sobre una función respuesta [1], con el agravante de que el número de experimentos necesarios es elevado si el número de factores es grande. En este caso se necesita realizar los dieciséis experimentos ( $2^4$ ) que se muestran en la tabla 1.

Nº	A Posición pelota	B Posición tope	C Extensión goma	D Tipo pelota	F Tirador	Respuesta (cm)
1	-	-	-	-	2	168
2	+	-	-	-	1	182
3	-	+	-	-	1	420
4	+	+	-	-	2	180
5	-	-	+	-	1	174
6	+	-	+	-	2	168
7	-	+	+	-	2	458
8	+	+	+	-	1	174
9	-	-	-	+	1	172
10	+	-	-	+	2	178
11	-	+	-	+	2	408
12	+	+	-	+	1	183
13	-	-	+	+	2	198
14	+	-	+	+	1	173
15	-	+	+	+	1	458
16	+	+	+	+	2	192

Tabla 1. Lay-out del experimento

<sup>1</sup> Para mayor información sobre las transformaciones puede recurrirse a [1, 44, 52, 57].

<sup>2</sup> Para ampliar información sobre este tema el lector puede recurrir a [1, 50].

Como se indicó antes, además de los cuatro factores primarios se tiene un quinto, el tirador, que fue clasificado como factor molesto. Si se asignaran en forma aleatoria estos dieciséis experimentos a los dos tiradores podría suceder, por ejemplo, que los ocho experimentos que se realizan con la posición de la pelota en el nivel (-) fueran hechos por el tirador 1, y los otros ocho, en la posición (+), por el tirador 2. Entonces, cuando se realizara el análisis no se sabría si la influencia encontrada es debida a la posición de la pelota, al tirador o a ambos a la vez. Para evitar la confusión del tirador con los efectos principales de los factores primarios existen tablas [1, 44, 50, 52, 58] que indican qué experimento es más conveniente emplear<sup>3</sup>. En el software empleado para el análisis de los datos también se encuentran dichas tablas.

También se estableció un procedimiento de lanzamiento estándar, para que ambos tiradores lo ejecutaran casi de la misma forma. Primero cada una de las partes de la catapulta se pone en la posición deseada; luego se deposita la pelota en la cazoleta existente en la parte superior del brazo móvil de la catapulta (variable A), y en seguida un tirador mueve el brazo de la catapulta hasta un ángulo de 170° hacia atrás, lo mantiene agarrado durante dos segundos y lo suelta; al chocar este brazo con el tope, la pelota sale despedida debido a la fuerza elástica que le transmite la goma.

#### 4.5. Realización de los experimentos

Para realizar los experimentos, primero hay que asegurarse de que todos los recursos necesarios estén disponibles; en ámbitos de manufactura e I&D suelen subestimarse los aspectos logísticos y de planificación del diseño de experimentos [1].

<sup>3</sup> Mediante el empleo de la tabla 1 se consigue que el tirador no esté confundido con ninguno de los efectos de los factores principales, pero está confundido con la interacción ABCD. Normalmente, estas interacciones de órdenes tan elevados no suelen tener un efecto importante, por lo que se podría asumir que todo el efecto calculado será debido al tirador.

Coleman y Montgomery [51] sugieren que antes de la realización del experimento puede ser conveniente realizar *pruebas piloto* que proporcionan información acerca de la consistencia del material experimental y chequean los sistemas de medición para realizar una primera estimación del error experimental. Si sucediera algún imprevisto, las pruebas piloto permiten modificar decisiones previas.

Cumplidas las etapas anteriores se procede a la realización del experimento y recopilar información. A pesar de la aparente sencillez de esta etapa, es necesario tener especial cuidado para que el experimento y la recolección de datos se realicen apropiadamente, siguiendo el *lay-out* del diseño y evitando posibles errores humanos en la experimentación misma o en la medición [43]. Los experimentos se deben realizar en orden aleatorio para evitar extraer conclusiones erróneas, por la presencia de algún factor no considerado [1]. Si no es posible aleatorizar alguno de los factores es recomendable aplicar los diseños *split-plot* [1, 50].

En el ejemplo, los alcances obtenidos figuran en la columna de respuesta de la tabla 1<sup>4</sup>.

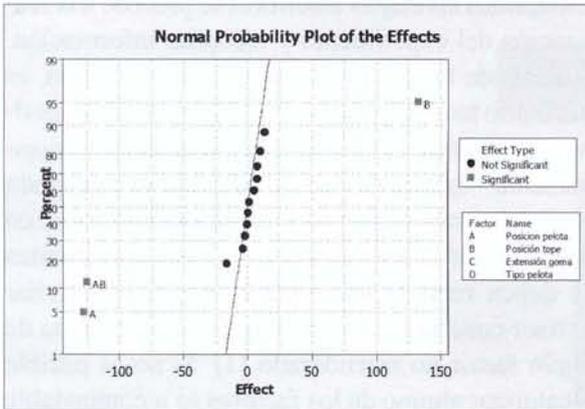
#### 4.6. Análisis de datos

Esta es la etapa que requiere mayor conocimiento estadístico. Los métodos estadísticos se utilizan para analizar los datos, procurando que los resultados y las conclusiones sean objetivos. La diversidad de software permite realizar los cálculos matemáticos y las gráficas necesarios; en este caso se ha utilizado MINITAB.

Este artículo se centra en detallar los pasos para realizar un DOE; en consecuencia, se presentará brevemente el análisis de datos. En Anthony [29] el lector puede encontrar una descripción detallada del análisis de datos en un diseño de experimentos, o recurrir a la bibliografía más común en este campo [1, 50].

<sup>4</sup> La experimentación y la recolección de datos fueron realizadas por dos alumnos del campus tecnológico de la Universidad de Navarra (Tecnun) en agosto de 2006.

Para los diseños factoriales completos sin réplicas se suele comenzar el análisis con la herramienta *Normal Probability Plot* (incluida en cualquier software estadístico); esta gráfica permite intuir los factores que influyen significativamente en la respuesta. El *Normal Probability Plot* del ejemplo (diagrama 1) permitió intuir que los factores significativos son A, B y la interacción AB.



Gráfica 1. *Normal Probability Plot*

Para determinar formalmente los efectos es habitual usar la prueba ADEVA (*Análisis De Varianza*). En general, el método consiste en obtener la variabilidad total del proceso y clasificarla en varios grupos, ejecutando pruebas con validez estadística para saber los efectos que influyen significativamente en la respuesta, con un determinado nivel de confianza [43]<sup>5</sup>.

En este caso, el ADEVA que se presenta en la tabla 2<sup>6</sup> permitió demostrar que los factores A, B y AB son significativos<sup>7</sup> y que por el contrario el efecto del tirador (bloque)<sup>8</sup> no lo fue estadísticamente. Para validar este análisis es necesario comprobar, mediante gráficas facilitadas por el software, si las suposiciones que implica el ADEVA (normalidad, varianza constante e independencia) se cumplen. En el ejemplo, las gráficas indicaron que tales suposiciones sí se cumplen.

La interpretación de la influencia de los factores principales A y B de manera aislada resulta sencilla, pero cuando existe una interacción entre ambos

factores ella no es tan sencilla. Si la interacción AB no tuviera un efecto significativo, la influencia del factor B—llamada *efecto* de B— que tiene un valor de 132,5 cm indicaría que si la pelota se lanza poniendo la posición del tope de la catapulta (factor B) en el nivel (+) se obtendría en promedio un alcance de 132,5 cm mayor que si ésta se lanzara desde el nivel (-), manteniendo el resto de las condiciones constantes. No obstante, la existencia de la interacción AB dificulta la interpretación de los efectos, al no poderse tomar una decisión definitiva sobre en qué nivel debe trabajar B, sin tener en cuenta también el nivel con el que se trabajará A. Es por ello que una gráfica de interacción AB (gráfica 2) visualiza el concepto y facilita la interpretación<sup>9</sup>.

Fuente de Variación	Factor estimado (cm)	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad	Media de cuadrados	Fo	P-Valor
Bloque (ABCD)	-1,8	12	1	12	0,2	0,707
A	-128,3	65.792	1	65.792	872,9	0
B	132,5	70.225	1	70.225	931,7	0
C	13	676	1	676	9	0,04
D	4,8	90	1	90	1,2	0,335
AB	-125,5	63.001	1	63.001	835,8	0
AC	-17	1.156	1	1.156	15,3	0,017
AD	0,8	2	1	2	0	0,871
BC	9,8	380	1	380	5	0,088
BD	-2,5	25	1	25	0,3	0,596
CD	7	196	1	196	2,6	0,182
Error		302	4	75		
Total corregido		201.858	15	13.457		

Tabla 2. Tabla ADEVA

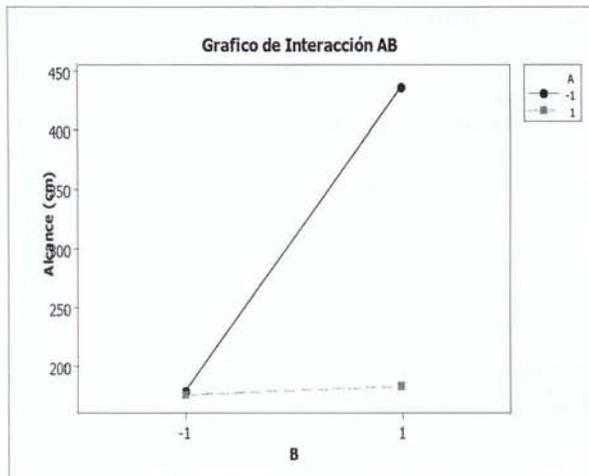
<sup>5</sup> Para ampliar información sobre este tema el lector puede recurrir a [1] o [50].

<sup>6</sup> También se incluye en la primera columna el cálculo de los efectos, lo cual no pertenece estrictamente a la tabla ADEVA.

<sup>7</sup> Se puede apreciar que C y AC tienen un efecto significativo, aunque su efecto es pequeño. A pesar de esto no se incluyeron en el análisis para simplificar la interpretación.

<sup>8</sup> Como se mencionó anteriormente el efecto bloque está confundido con la interacción ABCD.

<sup>9</sup> Para mayor información acerca de cómo interpretar las interacciones se puede recurrir a [1, 44, 52, 57].



Gráfica 2. Interacción AB

De la gráfica se deduce que el efecto de B no siempre es el mismo. Éste depende del nivel al que se encuentre A. Si A está en su posición (-1), el factor B tiene un efecto de unos 250 cm. Sin embargo, si A está en su posición (1) el efecto de B es prácticamente nulo.

Conocidos los efectos de los factores analizados y su interacción, se debe decidir acerca de las nuevas condiciones de trabajo. En el ejemplo, fijando A en su nivel (-) y B en su nivel (+) se lograría obtener la distancia de tiro máxima. Las otras variables, por no tener influencia significativa sobre la respuesta, se deben fijar de acuerdo con otros criterios, por ejemplo economía o practicidad.

Las condiciones de trabajo A(-) y B(+) corresponden a los experimentos número 3, 7, 11 y 15, en los que se obtuvieron alcances superiores a 4 m. Dado que se recomienda realizar *pruebas confirmatorias*, con el objetivo de que se asegure haber obtenido los resultados previstos [1, 59], en el caso analizado se ejecutaron dos de ellas, y se obtuvieron alcances de 436 y 462 cm.

Si continuara el interés en mejorar más el alcance de la catapulta sería posible realizar nuevas experimentaciones, por ejemplo modificando las posiciones de prueba de los anteriores factores en la dirección óptima. Este procedimiento recibe el nombre de

*secuenciación* de experimentos y permite optimizar la respuesta, obteniendo aun mejores resultados.

#### 4.7. Conclusiones y recomendaciones

Ya culminado el análisis de la información, los experimentadores deben definir si se han cumplido los objetivos propuestos y realizar una presentación con recomendaciones a los mandos y directivos [43]. Si ellos deciden aplicar algunas de las recomendaciones dadas, éstas deberán implementarse, asumiendo una tarea que no suele ser sencilla, pues cualquier cambio técnico debe ir acompañado de un cambio cultural [60]. Transcurrido cierto tiempo después de haber realizado las modificaciones, conviene realizar un control para evaluar si las ventajas identificadas se mantienen [43].

## 5. Conclusiones

El diseño de experimentos es una técnica que puede ayudar a conocer un proceso. Permite averiguar la forma como diversos factores presentes en él influyen sobre la respuesta y ajustarlos en los niveles que optimicen los resultados.

El objetivo de este artículo fue explicar los siete pasos propuestos por Montgomery para la realización de un experimento, aplicándolos al caso de conocimiento y optimización del funcionamiento de una catapulta; éste es un ejemplo didáctico que pretende mostrar la puesta en práctica de un diseño de experimentos de forma sencilla.

En este caso, a través de haber realizado un número relativamente pequeño de experimentos, la técnica DOE permitió determinar que los factores A (posición de la pelota) y B (posición del tope) son los más influyentes en el alcance de la catapulta, que ambos interactúan entre sí, y que para obtener el alcance máximo con el instrumento se debe trabajar en los niveles A (-) y B (+); los demás factores no influyen en forma significativa en el alcance de la catapulta y se pueden trabajar en los niveles más convenientes.

El DOE permite realizar diseños y análisis más elaborados que el presentado en este caso, siempre

con el objetivo de obtener la máxima cantidad de información con el mínimo número de experimentos. La planificación de la experimentación, que comprende las etapas de selección de factores, niveles, respuesta y la propia elección del diseño más conveniente, puede resultar complicada en la práctica; esto hace necesario disponer de una metodología detallada que ayude y facilite el desarrollo de cada etapa.

## Agradecimientos

Queremos agradecer a los alumnos Mónica Gutiérrez y Jon Ander Juaristi de Tecnun por la colaboración prestada en la realización de los experimentos; asimismo, al profesor Dr. Ing. Joachim Herrmann, catedrático de la Technische Universität Berlin, por la adaptación del diseño de la catapulta y su fabricación.

## Referencias bibliográficas

- [1] Montgomery, D. C. (2005). *Design and Analysis of Experiments*. 6 ed, ed. I. John Wiley & Sons.
- [2] Yang, C., Bi, X. Y., and Mao, Z. S. (2002). "Effect of Reaction Engineering Factors on Biphasic Hydroformylation of 1-Dodecene Catalyzed by Water-Soluble Rhodium Complex". *Journal of Molecular Catalysis a-Chemical*, Vol. 187 (1), pp. 35-46.
- [3] Sjoblom, J., et al. (2005). "Use of Experimental Design in Development of a Catalyst System". *Catalysis Today*, Vol. 100 (3-4), pp. 243-248.
- [4] Ruotolo, L. A. M. and Gubulin, J. C. (2005). "A Factorial-Design Study of the Variables Affecting the Electrochemical Reduction of Cr(VI) at Polyaniline-Modified Electrodes". *Chemical Engineering Journal*, Vol. 110 (1-3), pp. 113-121.
- [5] Ramirez, E., et al. (2004). "Sunflower Oil Hydrogenation on Pd/C in SC Propane in a Continuous Recycle Reactor". *Aiche Journal*, Vol. 50 (7), pp. 1545-1555.
- [6] Passmore, M. A., Patel, A. and Lorentzen, R. (2001). "The Influence of Engine Demand Map Design on Vehicle Perceived Performance". *International Journal of Vehicle Design*, Vol. 26 (5), pp. 509-522.
- [7] Nataraj, M., Arunachalam, V. P. and Dhandapani, N. (2005). "Optimizing Diesel Engine Parameters for Low Emissions Using Taguchi Method: Variation Risk Analysis Approach - Part I.". *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences*, Vol. 12 (3), pp. 169-181.
- [8] Farhang-Mehr, A. and Azarm, S. (2005). "Bayesian Meta-Modelling of Engineering Design Simulations: A Sequential Approach with Adaptation to Irregularities in the Response Behaviour". *International Journal For Numerical Methods In Engineering*, Vol. 62 (15), pp. 2104-2126.
- [9] Cervantes, M. J. and Engstrom, T. F. (2004). "Factorial Design Applied to CFD". *Journal of Fluids Engineering-Transactions of the Asme*, Vol. 126 (5), pp. 791-798.
- [10] Suffield, R. M., Dillman, S. H. and Haworth, J. E. (2004). "Evaluation of Antioxidant Performance of a Natural Product in Polyolefins". *Journal of Vinyl & Additive Technology*, Vol. 10 (1), pp. 52-56.
- [11] Ray, A. K., et al. (2004). "Development of Coating Colour Formation for Duplex Board Based on Plackett Burman Statistical Design". *Cellulose Chemistry and Technology*, Vol. 38 (3-4), pp. 265-275.
- [12] Liao, H. C. (2003). "Using PCR-TOPSIS to Optimise Taguchi's Multi-Response Problem". *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 22 (9-10), pp. 649-655.
- [13] Hoipkemeier-Wilson, L., et al. (2004). "Antifouling Potential of Lubricious, Micro-Engineered, PDMS Elastomers Against Zoospores of the Green Fouling Alga Ulva (Enteromorpha)". *Biofouling*, Vol. 20 (1), pp. 53-63.
- [14] Tong, K. W., Kwong, C. K. and Yu, K. M. (2004). "Process Optimisation of Transfer Moulding for Electronic Packages Using Artificial Neural Networks and Multiobjective Optimisation Techniques". *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 24 (9-10), pp. 675-685.
- [15] Marco, L., et al. (2004). "Optimization of a Car Brake Prototype as a Consequence of Successful DOE Training". *Quality and Reliability Engineering International*, Vol. 20 (5), pp. 469-480.
- [16] Galantucci, L. M., Percoco, G. and Spina, R. (2003). "Evaluation of Rapid Prototypes Obtained from Reverse Engineering". *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B-Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 217 (11), pp. 1543-1552.
- [17] Du, Z. C., et al. (2002). "Modeling Approach of Regression Orthogonal Experiment Design for the Thermal Error Compensation of a CNC Turning Center". *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 129 (1-3), pp. 619-623.

- [18] Wingbrant, H., et al. (2003). "Using a MISiCFET Device as a Cold Start Sensor". *Sensors and Actuators B-Chemical*, Vol. 93 (1-3), pp. 295-303.
- [19] Ogle, T. and Hornberger, L. (2001). "Technical Note: Reduction of Measurement Variation: Small Acoustic Chamber Screening of Hard Disk Drives". *Noise Control Engineering Journal*, Vol. 49 (2), pp. 103-107.
- [20] Antony, J., Kaye, M. and Frangou, A. (1998). "A Strategic Methodology to the Use of Advanced Statistical Quality Improvement Techniques". *The TQM Magazine*, Vol. 10 (3), pp. 169-176.
- [21] Tanco, M., et al. (2006). "Is DoE really used in Industries?" *ENBIS 6*. Wroclaw, Poland.
- [22] EURobust. (2003). *Use and Knowledge of Robust Design Methodology - A survey of European Industry*. Chalmers University: Sweden. p. 1-15.
- [23] Gremyr, I., Arvidsson, M. and Johansson, P. (2003). "Robust Design Methodology: A Status in the Swedish Manufacturing Industry". *Quality and Reliability Engineering International*, Vol. 19, pp. 285-293.
- [24] Ricondo, I. (2005). *FIP<sup>3</sup>. Marco para la mejora de la calidad y los procesos en las organizaciones*. PhD. TECNUN-University of Navarra: San Sebastian-Spain.
- [25] Hoadley, B. A. and Kettinger, J. R. (1990). "Communications between Statisticians and Engineers/physical Scientist". *Technometrics*, Vol. 32 (3), pp. 243-247.
- [26] Hahn, G. and Hoerl, R. (1998). "Key Challenges for Statisticians in Business and Industry". *Technometrics*, Vol. 40 (3), pp. 195-200.
- [27] Goh, T. N. (2001). "A Pragmatic Approach to Experimental Design in Industry". *Journal of Applied Statistics*, Vol. 28 (3-4), pp. 391-398.
- [28] Viles, E. (2006). "Statistics for Industrial Engineers". *Scientific Computing World*, Vol. (June/July), pp. 40-41.
- [29] Antony, J. (2002). "Training for Design of Experiments Using a Catapult". *Quality and Reliability Engineering International*, Vol. 18, pp. 29-35.
- [30] Box, G. E. P. and Liu, P. Y. T. (1999). "Statistics as a Catalyst to learning by Scientific Method Part I". *Journal of Quality Technology*, Vol. 31 (1), pp. 1-15.
- [31] Fisher, R. A. (1935). *The Design of Experiments*. John Wiley, New York.
- [32] Box, G. E. P. and Wilson, K. B. (1951). "On the Experimental Attainment of Optimum Conditions". *Journal of the Royal Statistical Society, Series B* (13), pp. 1-45.
- [33] Taguchi, G. (1987). *System of Experimental Design: Engineering Methods to Optimize Quality and Minimize Cost*. Quality Resources, White Plains, New York.
- [34] Taguchi, G. and Wu, Y. (1980). *Introduction to Off-Line Quality Control*. Central Japan Quality Control Association, Nagoya, Japan.
- [35] Box, G. E. P. (1988). "Signal to Noise Ratios, Performance Criteria, and Transformations". *Technometrics*, Vol. 30 (1), pp. 1-17.
- [36] Box, G. E. P., Bisgaard, S. and Fung, C. (1988). "An Explanation and Critique of Taguchi's Contributions to Quality Engineering". *Quality and Reliability Engineering International*, Vol. 4, pp. 123-131.
- [37] Hunter, J. S. (1985). "Statistical Design Applied to Product Design". *Journal of Quality Technology*, Vol. 17, pp. 210-221.
- [38] Myers, R. H. and Montgomery, D. C. (2002). *Response Surface Methodology. Process and Product Optimization Using Designed Experiments*. 2 ed., Wiley.
- [39] Pignatiello, J. J. and Ramberg, J. (1991). "Top Ten Triumphs and Tragedies of Genichi Taguchi". *Quality Engineering*, Vol. 4, pp. 211-225.
- [40] Nair, V. N. (1992). "Taguchi's Parameter Design: A Panel Discussion". *Technometrics*, Vol. 31 (2), pp. 127-161.
- [41] Kacker, R. N. (1985). "Off - Line Quality Control, Parameter Design and the Taguchi Method". *Journal of Quality Technology*, Vol. 17 (4), pp. 176-188.
- [42] Hahn, G. J. (1984). "Discussion - Experimental Design: Review and Comment". *Technometrics*, Vol. 26 (2), pp. 110-113.
- [43] Lorenzen, T. J. and Anderson, V. L. (1993). *Design of Experiments - A No-Name Approach*, ed. Dekker. 414.
- [44] Wu, C. F. J. and Hamada, M. (2000). *Experiments*. Ed. W.-. Interscience.
- [45] Hinkelmann, K. and Kempthorne, O. (1994). *Design and Analysis of Experiments*. Ed. W.-. Interscience. Vol. I, 495.
- [46] Hahn, G. J. (1977). "Some Things Engineers Should Know about Experimental Design". *Journal of Quality Technology*, Vol. 9 (1), pp. 13-20.
- [47] Cochran, W. G. and Cox, G.M. (1957). *Experimental Design*. Wiley Publications in statistics, ed. Wiley, New York.
- [48] Drain, D. (1997). *Handbook of Experimental Methods for Process Improvement*. Ed. T. Science, 317.
- [49] Pande, P. S., Neuman, R. P. and Cavanagh, R. R. (2000). *The Six Sigma Way: How GE, Motorola, and Other Top Companies are Honing their performance*. Mc Graw Hill.
- [50] Box, G. E. P., Hunter, J. S. and Hunter, W.G. (2005). *Statistics for Experimenters - Design, Innovation and Discovery*. Second Edition ed. Wiley Series in Probability and Statistics, ed. Wiley. John Wiley & Sons.
- [51] Coleman, D. E. and Montgomery, D. C. (1993). "A Systematic Approach to Planning for a Designed Industrial Experiment". *Technometrics*, Vol. 35 (1), pp. 1-12.

- [52] Myers, R. H. and Montgomery, D. C. (2002). *Response Surface Methodology*. 2ª Edición W.-. Interscience.
- [53] Murphy, T. E. and Tsui, K. L. (2005). "A Review of Robust Design for Multiple Responses". *Research in Engineering Design*, Vol. 16, p. 118-132.
- [54] Plackett, R. L. and Burman, J. P. (1946). "The Design of Optimum Multifactorial Experiments". *Biometrika*, Vol. 33, pp. 305-325.
- [55] Box, G. E. P. and Wilson, K. B. (1951). "On the Experimental Attainment of Optimum Conditions". *Journal of the Royal Statistical Society*, B13, pp. 1-45.
- [56] Box, G. E. P. and Behnken, D. W. (1960). "Some New Three Level Design for the Study of Quantitative Variables". *Technometrics*, Vol. 2 (4), pp. 455-475.
- [57] Box, G. E. P., Hunter, W. G. and Hunter, J. S. (1978). *Statistics for Experimenters*. Ed. W. Interscience. .
- [58] Prat, A., et al. (2000). *Métodos estadísticos. Control y mejora de la calidad*. Barcelona: Ediciones UPC.
- [59] Roy, R. K. (2001). *Design of Experiments Using the Taguchi Approach: 16 Steps to Product and Process Improvement*. Wiley.
- [60] Steinberg, D. M. and Hunter, W. G. (1984). "Response - Experimental Design: Review and Comment". *Technometrics*, Vol. 26 (2), pp. 128-130.