

# UNA HERRAMIENTA DIDÁCTICA PARA EL APRENDIZAJE DE LAS TÉCNICAS DE DISEÑO ESTADÍSTICO DE EXPERIMENTOS

Ester Gutiérrez Moya  
Escuela Superior de Ingenieros  
Universidad de Sevilla

## Resumen

La Escuela Superior de Ingenieros de la Universidad de Sevilla lleva impartiendo módulos de Diseño de Experimentos (DE) durante más de siete cursos. Diversas experiencias didácticas previas mostraban que los aspectos conceptuales del DE, no eran asimilables fácilmente por los estudiantes. Actualmente, gran parte de los profesionales de la ingeniería rechazan la idea de aplicar DE, a pesar de ser una técnica muy efectiva en la mejora de la calidad de los productos y procesos industriales, debido a la dificultad que les supone la mayoría de los conceptos estadísticos. Este trabajo presenta un nuevo enfoque didáctico cuyo objetivo es facilitar el aprendizaje de conceptos, simplificar los mecanismos y, por consiguiente, ayudar a los estudiantes a una mejor comprensión e implementación de DE en su actual y futura experiencia profesional. Este enfoque didáctico de cálculo y análisis se ha desarrollado para la mayoría de los diseños experimentales aplicados en ingeniería. La experiencia docente se presenta en un ejemplo práctico utilizando como soporte hojas de cálculo informatizadas.

*Palabras clave:* Diseño de experimentos, enseñanza, herramienta informatizada.

## Abstract

The Engineering High School of the University of Seville is offering Design of Experiments (DE) courses for more than seven courses. Previous teaching experiences showed that the conceptual aspects of DE has been somehow difficult to be rapidly and efficiently assimilated by students. Although DE has proved to be very effective in improving quality through process parameters' optimization, many engineers reject the idea of applying the technique on the floor level because of the conceptual and statistical barriers. This paper develops and introduces a new teaching approach in order to clarify the conceptual aspects and simplify the mechanics underlying the DE techniques and, mainly based on the use of simple and straight forward calculation and analysis worksheets that have been developed for the most commonly used experimental designs. This paper presents the approach with a simple of the most pertinent calculation and analysis worksheets used along with a practical example.

*Key words:* Design of experiments, teaching, computerized tool.



que contribuirá a fortalecer la configuración de una verdadera *cultura estadística* en los profesionales de la ingeniería. Este nuevo enfoque pretende:

- Estimular el interés del alumno por la estadística en general, como ciencia que investiga la realidad mediante la construcción de modelos y su validación.
- Conocer la frecuente aplicación del Control de Calidad en el mundo de la Ingeniería, y ser capaz de discernir aquellas situaciones en las que es posible y necesario un análisis estadístico para la solución de problemas reales.
- Adquirir y comprender la terminología estadística y el modo de razonar.
- Desarrollar la aptitud de asimilar nuevas técnicas estadísticas que pueda necesitar en su vida profesional.

Todos estos objetivos están orientados a la mejora de la capacidad cognoscitiva, procedimental/instrumental y actitudinal del alumno en sus futuras y presentes actuaciones como ingeniero.

El enfoque está basado fundamentalmente en el uso de hojas de cálculo (con posibilidad de utilizar macros), así como de un proceso de análisis simple y claro, desarrollado específicamente con este fin, para los principales diseños experimentales. Para cada uno de ellos, las herramientas de trabajo están disponibles en carpetas o archivos compatibles tanto para Microsoft Excel® como para Lotus®. Estas herramientas están diseñadas para guiar y ayudar a los estudiantes, de una forma estructurada y sencilla, a realizar manualmente los cálculos y el análisis del diseño experimental. De esta forma, los alumnos pueden comprobar fácilmente los resultados obtenidos a través de las aplica-

ciones informáticas apropiadas. Este trabajo presenta, a través de un ejemplo práctico, una aplicación de esta herramienta didáctica de ayuda a la evaluación y análisis, mediante hojas de cálculo.

### 3. CONCEPTOS BÁSICOS DE LA HERRAMIENTA

El enfoque adoptado en el aprendizaje de DE está basado principalmente en el uso de hojas de cálculo simples y personalizadas para la mayoría de los diseños utilizados. El tratamiento de la asignatura se lleva a cabo mediante el aprendizaje, de forma práctica, de la teoría estadística y los fundamentos matemáticos, explicando cómo los experimentos pueden ser planificados, ejecutados y analizados. Para cada uno de los diseños se dispone de ocho tipos diferentes de hojas de trabajo: edición de datos, cálculo de efectos, diagrama de efectos, diagrama de efectos de Pareto, gráfico de probabilidad normal de los efectos, cálculo de la suma de los cuadrados, tabla ADEVA, y análisis de los residuos. Se dispone de una versión específica para cada uno de los 20 diseños tratados en el curso: diseño completo factorial (2,3 y 4 factores), diseño de factoriales fraccionarios (8 o 16 experimentos, hasta 11 factores) y matrices ortogonales de Taguchi ( $L_4$ ,  $L_8$ ,  $L_{16}$ ,  $L_9$ ,  $L_{12}$  y  $L_{18}$ ). Asimismo, las hojas de trabajo están disponibles para el caso unifactorial y multifactorial de las técnicas de ADEVA (2 ó 3 factores, con 2 ó 3 niveles). El análisis de cualquiera de estos diseños mediante la hoja de cálculo adecuada se lleva a cabo de forma sencilla y fácil, ya que, en primer lugar, los estudiantes deben elegir, de entre todas las hojas de trabajo que contienen el libro, la más adecuada para el diseño requerido.

Orden	Respuesta	Tipo recipiente	Tipo agua	Tamaño recipiente	Posición tapa	AB	AC	AD						
1	195	195	195	195	195	195	195	195						
2	204	204	204	204	204	204	204	204						
3	216	216	216	216	216	216	216	216						
4	193	193	193	193	193	193	193	193						
5	167	167	167	167	167	167	167	167						
6	142	142	142	142	142	142	142	142						
7	158	158	158	158	158	158	158	158						
8	153	153	153	153	153	153	153	153						
<b>Total</b>	1428	662	766	762	666	734	694	782	646	718	710	722	706	720
<b>Numero</b>	8	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
<b>Promet</b>	179	165,5	191,5	190,5	166,5	183,5	173,5	195,5	161,5	179,5	177,5	180,5	177	180
<b>Efectos</b>		26		-24		-10		-34		-2		-4		-3

Figura 1. Hoja de cálculo utilizada para la estimación de los efectos.

En el libro, las hojas de trabajo están agrupadas según los tipos de diseño, así como ordenadas para que el análisis completo este estructurado fácilmente. En segundo lugar, los estudiantes usan la hoja de cálculo destinada a la edición de datos para planificar y establecer el conjunto de todas las pruebas experimentales. Una vez que se insertan los datos del proceso analizado, deben rellenar las hojas siguientes. Este proceso les lleva a la identificación de los efectos significativos de efectos principales y de interacción de segundo orden, permitiéndole determinar el modelo de predicción más adecuado para la optimización del proceso. De esta forma, las hojas de cálculo permiten a los estudiantes interactuar con los resultados a través de la apropiada hoja de trabajo informatizada.

Además, las hojas de cálculo proporcionan a los estudiantes una más rápida y mejor comprensión del impacto que cualquier alteración en los datos puede tener en el resultado del experimento. Se ha demostrado que esta última propiedad ha sido muy beneficiosa en los procesos de aprendizaje y comprensión del alumno hacia el impacto de cualquier tipo de error experimental en los resultados finales. Estas hojas de cálculo elaboradas manualmente se emplean únicamente como una herramienta de aprendizaje para ayudar al dominio del análisis DE. Finalmente, una vez que los estudiantes han finalizado el curso, sólo necesitan usar el formulario formatizado para planificar y analizar futuros experimentos.

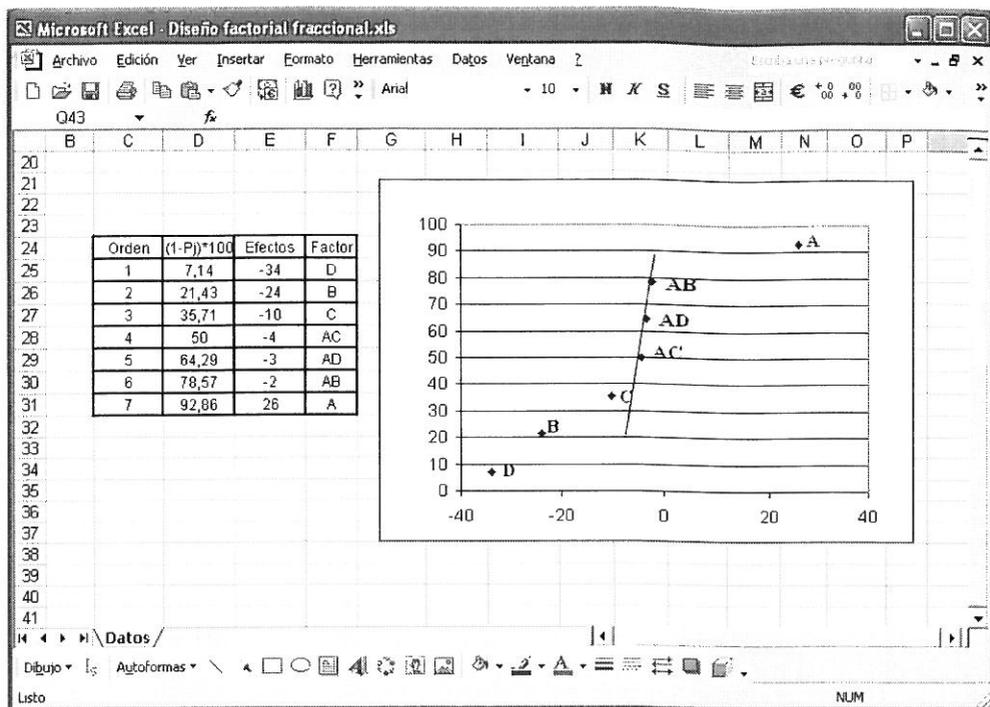


Figura 2. Hoja de cálculo para representar el gráfico de probabilidad normal de los efectos.

#### 4. UN EJEMPLO PRÁCTICO

En este apartado se presentará un ejemplo que permita comprender los conceptos más destacados del análisis de DE a través del uso de hojas de cálculo informatizadas. Para ilustrar lo anterior se ha seleccionado un ejercicio propuesto (Levine, 1995) donde se estudian los factores que pueden influir en el tiempo de ebullición de 25cl de agua en una determinada fuente de calor. Se identifican cinco factores como posibles responsables del tiempo de ebullición del agua (expresado en segundos). La prueba se configura como un diseño factorial  $2^{5-1}$  (resolución tipo IV) en el cual los ocho tratamientos se seleccionan a partir de un total de 16 posibles

combinaciones, utilizando como generador de diseño ABCD. Los cinco factores, y sus correspondientes niveles experimentales, son los siguientes:

- A.- Tipo de recipiente [aluminio, acero inoxidable].
- B.- Tipo de agua [corriente, embotellada].
- C.- Tamaño del recipiente [pequeño, grande].
- D.- Posición de la tapa [quitada, puesta].

A continuación se presentan los correspondientes formularios. La figura 1 es una muestra de las hojas de cálculo utilizadas para calcular la estimación de los efectos de los factores. Las dos primeras columnas muestran

Diseño	Efecto	Efecto <sup>2</sup>	SC	SC Total
A	26	676	1352	272,25
B	-24	576	1152	650,25
C	-10	100	200	1406,25
D	-34	1156	2312	210,25
AB	-2	4	8	132,25
AC	-4	16	32	1332,25
AD	-3	9	18	420,25

Figura 3. Suma de cuadrados de los efectos. Nota:  $SC = (N^2 \cdot \text{Efecto}^2) / N \cdot 2^4$ .

la ordenación de los ensayos y los valores de las respuestas observadas (individual o suma). El resto de las columnas muestran el mismo valor de la variable respuesta las cuales deben ser convenientemente utilizadas en el cálculo de los promedios. La última fila se utiliza para el calcular la estimación de los efectos, los cuales se calculan a partir de la diferencia, para cada uno de los niveles, entre los valores promedios inferiores y superiores.

En el proceso de análisis de los resultados se distinguen dos etapas, una primera, donde se realizan las pruebas gráficas las cuales permiten visualizar de forma sencilla las principales conclusiones del experimento, y una segunda, en la que se practican pruebas

analíticas que permiten validar las conclusiones que visualmente se han obtenido en la etapa anterior.

La figura 2 presenta la hoja de cálculo utilizada para la construcción del gráfico de probabilidad normal de los efectos (Boccardo y otros, 1978), siendo útil para la identificación de los efectos que pueden ser significativos. En esta figura los puntos que se encuentran más próximos de la línea marcada no muestran una influencia significativa en la variable respuesta, sin embargo los puntos que se encuentran más distantes de la línea trazada son factores con efectos significativos en la variable respuesta. En este caso, se puede observar que las interacciones AB+AC+BD y AD+BC y posiblemente el fa

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1									
2	Fuente de variación		SC	df	CM	Fexp	Fteorica	P-valor	
3	A		1352	1	1352	15,7209	10,128	0,02866	
4	B		1152	1	1152	13,3953		0,03525	
5	C		200	1	200				
6	D		2312	1	2312	26,8837		0,01393	
7	AB		8	1	8				
8	AC		32	1	32				
9	AD		18	1	18				
10	Error		258	3	86				
11	Total		5074	7					
12									
13									
14									
15									
16									
17									
18									
19									
20									
21									
22									
23									

Figura 4. Hoja de cálculo utilizada para el análisis ADEVA.

C se encuentran relativamente próximas a la línea recta, por lo tanto sus efectos hacia la variable respuesta no serían tenidos en cuenta. Sin embargo, los factores A, B y D producen efectos importantes en la variable respuesta tal como se deduce del gráfico. Además, si suponemos que las interacciones de los tres factores (ABC, ABD, ACD y BCD) y la cuarta interacción ABCD no son importantes, se pueden realizar las siguientes conclusiones basadas en los resultados muestrales.

- El tiempo que tarda en hervir el agua es en promedio 26 segundos superior en un recipiente de acero inoxidable que en un recipiente de aluminio.
- El agua embotellada tarada en promedio 24 segundos menos en el agua corriente.

- El tiempo que tarda en hervir el agua en un recipiente grande es por término medio 10 segundos inferior a la de un recipiente pequeño.
- El tiempo que tarda en hervir el agua cuando esta tapada el recipiente es por término medio 34 segundos inferior que si se quita la tapa.
- No existe evidencia de los efectos de la interacción de dos factores.

Seguidamente, se procede a desarrollar los pasos de la segunda etapa de carácter analítico.

En la figura 3 se calcula la suma de los cuadrados para cada efecto a través de las hojas de cálculo especificadas. Estas sumas de

Orden	A	B	C	D	AB	AC	AD	Y	$\bar{Y}$	Res
1	-	-	-	-	+	+	+	195	195	0
2	+	+	-	-	+	-	-	204	197	-7
3	+	-	+	-	-	+	-	216	221	5
4	+	-	-	+	-	-	+	193	187	-6
5	-	+	+	-	-	-	+	167	171	4
6	-	+	-	+	-	+	-	142	137	-5
7	-	-	+	+	+	-	-	158	161	3
8	+	+	+	+	+	+	+	153	163	10
$S^2_{\text{A}}$	560,25	547,25	627,25	364,25	497,25	911,25	314			
$S^2_{\text{D}}$	370,25	433,25	591,25	326,25	769,25	349,25	950			
Fexp	1,51	1,26	1,06	1,12	0,65	2,61	0,33			
Fteórico	9,26									

Figura 5. Hoja de cálculo utilizada para el análisis de los residuos.

cuadrados son necesarias posteriormente en la construcción de la tabla ADEVA, figura 4, en la cual la varianza de la variable respuesta es descompuesta en todos sus componentes. En este caso, se han considerado dentro del término error las sumas de cuadrados de los factores menos significativos (según el gráfico de probabilidad normal), ya que no hay réplicas para la evaluación del error experimental. El análisis proporciona la suficiente evidencia muestral, al 5% de nivel de significación, para afirmar que los factores A, B y D ejercen una influencia significativa en el tiempo de ebullición del agua. Esta afirmación es aconsejable que sea consultada con un experto en la materia objeto de análisis para evitar incurrir en implicaciones erróneas.

Los resultados anteriores permiten formular un modelo de predicción en función de los efectos más significativos detectados en el diseño experimental:

$$\hat{Y} = 179 + (26/2) \cdot A + (-24/2) \cdot B + (-34/2)$$

La expresión (1) permite estimar y decir los tiempos estimados de ebullición para cada experimento, así como el análisis de la variabilidad de la respuesta, tal como muestra en la figura 5. En dicha hoja de cálculo se contrasta la igualdad de las varianzas de los efectos para cada uno de los factores pudiéndose concluir que ninguno de los factores ejerce una influencia significativa sobre la respuesta.

la variabilidad de la respuesta al 5% de nivel de significación.

En el ejemplo tratado el objetivo que se plantea es la detección de los factores que mayor influencia ejercen en el tiempo de ebullición del agua, esta identificación contribuirá a minimizar el tiempo de ebullición del agua. A la vista de los resultados obtenidos, se recomendaría ajustar los factores hacia los niveles más adecuados para la consecución de dicho objetivo, esto es, utilizar un recipiente de aluminio, agua embotellada y con una tapadera puesta. El resto de factores (no significativos) pueden ser ajustados según sus niveles más económicos.

## 5. CONCLUSIÓN

Este trabajo ha presentado una experiencia docente donde se desarrolla un nuevo enfoque para la aclaración de los aspectos conceptuales y simplificación de los cálculos de las técnicas de DE. Todo lo anterior está destinado a ayudar a los estudiantes a mejorar la comprensión y la implementación de DE en su actual y futuro profesional.

Durante estos últimos tres años, el enfoque presentado en este trabajo ha sido aplicado en diversos cursos donde se imparte DE y

la reacción recibida de los estudiantes ha sido positiva permitiéndoles fomentar un razonamiento crítico en la ingeniería. El alcance de la herramienta didáctica propuesta ha resultado favorable para la mejora de la comprensión e interés por parte de los alumnos hacia DE. Así lo manifestaban los alumnos en el informe de evaluación de la asignatura, así como en las convocatorias voluntarias anuales de la Calidad de la Enseñanza llevadas a cabo por el Vicerrectorado de Docencia de la Universidad de Sevilla. Por todo lo anterior, estas herramientas han demostrado ser efectivas en el pensamiento inductivo revelando cómo la metodología DE funciona y cómo puede ser utilizada y aplicada en cualquier entorno industrial como una herramienta de gran poder desde el punto de vista de mejora de la calidad y la productividad empresarial.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BOX, G.E.P, HUNTER, W.G., HUNTER, J.S.. (1978). *Statistics for Experimenters*. New York, Wiley,.
- LEVINE, D.M, RAMSEY, P.P. BERENSON, M.L. (1995). *Business Statistics for Quality and Productivity*. New Jersey, Prentice-Hall.