

# DIFERENTES ENFOQUES DEL DISEÑO DE EXPERIMENTOS (DOE)<sup>1</sup>

---

Martín Tanco; Elisabeth Viles; Lourdes Pozueta<sup>2</sup>

---

**Resumen.-** Muchos ingenieros seguramente hayan oído hablar o leído sobre el Diseño de Experimentos, pero son incapaces de diferenciar (seguramente ni los conocen) los distintos enfoques que se han desarrollado a largo de la historia del Diseño de Experimentos. Los tres enfoques principales son: Clásico, Shainin y Taguchi. En este artículo se presenta esquemáticamente los tres enfoques, así como una comparación entre ellos. Por lo tanto, este ensayo es útil para aprender sobre ellos, saber diferenciarlos e identificar cuando es mejor utilizar cada uno de ellos.

Palabras clave: Diseño de Experimentos, Experimentación, Taguchi, Shainin

## **1. Introducción al Diseño de Experimentos**

A pesar de que la técnica del Diseño de Experimentos (DoE) no surgió hasta el siglo XX, la experimentación es tan vieja como la existencia del hombre. Durante muchos años se utilizó la estrategia de un-factor-por-vez (OFAT), conocida como el método científico y atribuida a Francis Bacon en el siglo XVII, aunque basada en la cultura helénica. La estrategia de “un-factor-por-vez” consiste en ir modificando cada vez un solo factor (variable) y distinguir los efectos que tiene sobre la respuesta cada factor por separado. Esta estrategia, a pesar de ser la más utilizada en las empresas y seguir el “método científico”<sup>3</sup>, es ineficiente para hallar las mejores condiciones del proceso. Dicha metodología tuvo su apogeo con Thomas Edison, que aplicó la estrategia OFAT para inventar la bombilla de luz [2].

Estas estrategias quedaron obsoletas, cuando Sir Ronald Fisher en los años 1920 descubrió un método mucho más eficiente para experimentar basado en los diseños factoriales. El diseño de experimentos fue aplicado por primera vez por Fisher en Inglaterra en la agricultura, y sus experiencias le llevaron a publicar en 1935, su libro “Design of Experiments” [3]. Sus estudios estaban centrados en mejorar la producción de patatas, trabajando para la Estación Agrícola Experimental de Rothamstede en Londres.

Se entiende el Diseño de Experimentos como “una metodología para aplicar sistemáticamente la estadística al proceso de experimentación”. Más técnicamente, consiste en realizar una serie de pruebas en las que se inducen cambios deliberados en las variables de un proceso de manera

---

<sup>1</sup> Versión traducida y reducida del capítulo 52, pag 611-622 del libro “Advances in Electrical Engineering and Computational Science”, Springer 2009, cuyos autores son los mismos que los del presente artículo [1]

<sup>2</sup> Dr. Ing. Martín Tanco, Universidad de Montevideo: [mtanco@tecnun.es](mailto:mtanco@tecnun.es) ; Dra. Elisabeth Viles: TECNUN, Universidad de Navarra, San Sebastián, España.- Dra. Lourdes Pozueta Directora de la consultora AVANCEX+I, España

<sup>3</sup> Del griego: “Camino hacia el conocimiento”. Definido por Francis Bacon (1561-1626) como conjunto de pasos que trata de protegernos de la subjetividad del conocimiento.

que es posible observar e identificar las causas de los cambios en la respuesta de salida elegida [5].

El DoE es altamente efectivo para aquellos procesos, que su rendimiento se ve afectado por varios factores. Con esta técnica se puede conseguir entre otras, mejorar el rendimiento de un proceso, reducir su variabilidad o los costos de producción. Todos los tipos de industrias se pueden beneficiar de la aplicación del DoE, incluso aquellas de servicio.

## 2. Diferentes enfoques al Diseño de Experimentos

Existen tres enfoques más populares del Diseño de Experimentos: Clásico, Taguchi y Shainin. A pesar de ellos, muy poco ingenieros saben entender la diferencia entre ellos y ser capaces de decidir correctamente que enfoque es más conveniente para su empresa. La respuesta a estas preguntas está fuertemente influenciada por el conocimiento y la experiencia que se posee sobre cada enfoque del DoE. Por ello, se intenta explicar en este artículo cada uno de los enfoques, de manera de poder evaluar cada uno de ellos. Es importante recordar que los tres enfoques del DoE (Clásico, Taguchi y Shainin) son muy superiores a la estrategia de OFAT.

Cada uno de los enfoques tiene sus partidarios y sus detractores, por lo que el debate entre ellos fue durante muchos años muy fuerte y generalmente poco constructivo. A pesar de ello, Deming (gurú de la Calidad) decía: “Cualquier técnica puede ser útil, si se conocen y entienden sus limitaciones”.

### 2.1. Enfoque Clásico

Montgomery [4] considera que hubo cuatro etapas en el desarrollo del diseño de experimentos clásico. La **primera etapa**, iniciada en los años veinte por Fisher, se caracteriza por la introducción sistemática del pensamiento científico, la aplicación de diseños factoriales y el análisis de varianza (ANOVA) en las investigaciones experimentales científicas. En la década del los 30s y 40s, se introdujeron los diseños factoriales fraccionados, como solución al exceso de experimentos necesarios para llevar cabo factoriales completos. Estos diseños consisten en elegir una fracción adecuada de un factorial completo. Proveen una manera efectiva y “barata” de estudiar muchos factores, a la expensa de ignorar interacciones de alto orden. Esto se considera de bajo riesgo, ya que las interacciones de alto orden son generalmente insignificantes.

La **segunda etapa**, iniciada por Box & Wilson [5], se caracteriza por el desarrollo de lo que posteriormente se denominará como metodología de superficie de respuesta (RSM). Estos autores notaron que los experimentos industriales diferían de los experimentos en la agricultura en dos aspectos: a) *inmediatez*, porque la respuesta se puede observar bastante rápido, sin tener que esperar tanto como en la agricultura; b) *secuencialidad*: el experimentador puede realizar unos pocos experimentos y planificar los siguientes experimentos en función de los resultados. Durante los siguientes años, el DoE y el RSM se extendieron a la industria química y a los procesos industriales, en especial en las áreas de investigación y desarrollo (I+D). En esta etapa surgen los diseños para estimar funciones cuadráticas tales como los diseños compuestos centrales (CCD) y diseños de Box-Behnken (BBD).

La **tercera etapa** comienza a principios de los 80s, con la aparición de los enfoques de Taguchi y Shainin, presentados como metodologías sencillas y eficientes para la experimentación. La primera reacción fue la crítica a dichos enfoques atacando su validez estadística. A pesar de ello, principalmente los trabajos de Taguchi 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 los semiconductores. Como consecuencia, muchos académicos y estadísticos comenzaron a apreciar muchas ideas de los nuevos enfoques, lo cual generó un cambio profundo en el enfoque clásico del DoE. Por ejemplo, la reducción de la variabilidad empezó a ser un área de mucha investigación, al igual que el esfuerzo por desarrollar metodologías y guías para simplificar la aplicación del DoE; lo que dio pie al comienzo de la cuarta etapa del diseño de experimentos en los años noventa, en la que actualmente transcurre.

En esta **cuarta etapa**, la democratización de la estadística, gracias en parte a la expansión del Seis Sigma y la gran oferta de software estadístico, ayudaron a que el DoE sea aplicado en todos los tipos de industria. En estos últimos años existió un incremento en las publicaciones sobre el Diseño de Experimentos [6], lo cual permitió desarrollar significativamente la técnica. Además la automatización de los cálculos y gráficas a través de software, permitió simplificar la técnica para que fuera utilizada por más ingenieros y científicos. En esta etapa surge el concepto de optimalidad, lo cual lleva a la utilización de diseños “óptimos”.

En resumen, muchos estadísticos, ingenieros y científicos contribuyeron al desarrollo y aplicación del DoE en las industrias a lo largo de estos casi 90 años del enfoque clásico. Esto provocó que dicho enfoque esté consolidado y sea un enfoque válido y robusto para aplicar el DoE.

## 2.2. Enfoque de Taguchi

Como investigador en un laboratorio de control electrónico en Japón, un ingeniero llamado Geneichi Taguchi desarrolló en los años 40s un método para el Diseño de Experimentos. A pesar de que su primera publicación en japonés data de los 50s, este enfoque al DoE no fue introducido en USA ni Europa hasta principios de la década de los 80s. Sus libros más importantes, fueron: “Introduction to Quality Engineering” [7] y “System of Experimental Design” [8]. La década siguiente a la aparición de estos métodos en occidente, fue de continuos debates entre dos bandos: aquellos fanatizados con las nuevas virtudes y potencia del método de Taguchi contra los clásicos que exponían continuamente sus fallas y limitaciones [9].

Taguchi promovió las técnicas estadísticas desde una perspectiva ingenieril, en contraposición con la perspectiva estadística del DoE del momento. Taguchi desarrolló una metodología para la resolución de problemas, a la cual le denominó como “Ingeniería de Calidad” (Quality Engineering) [10]. Lamentablemente, hay una confusión importante en la bibliografía cuando se trata de sistemas que ayuden a reducir la variabilidad, ya que los términos en inglés “Robust Design”, “Taguchi Methods”, “Quality Engineering” y “Parameter design” son utilizados como sinónimos.

Los conceptos básicos sobre los métodos de Taguchi son:

- Un producto de calidad es aquel que causa una **pérdida mínima a la sociedad** durante toda su vida. La relación entre esta pérdida y las características técnicas está expresada en la función de pérdida, que es proporcional al cuadrado de las desviaciones de la respuesta sobre su valor deseado (target value).
- Taguchi desglosa su estrategia de “ingeniería de calidad” en tres fases: **Diseño del Sistema, Diseño de Parámetros y Diseño de Tolerancias**. El diseño de sistemas intenta innovar y averiguar cuales son los factores y niveles que deberían operar. El Diseño de parámetros, intenta incrementar el rendimiento de un proceso/producto ajustando los niveles de los factores. Generalmente, se le conoce a esta fase como

Método de Taguchi y es la fase más relacionada con el DoE. Finalmente, el diseño de tolerancias intenta determinar los parámetros de control para cada factor y nivel identificado en la etapa anterior.

- Se debe **cambiar el objetivo de la experimentación** de obtener resultados conforme a las especificaciones a alcanzar un valor deseado minimizando la variabilidad.

Debido a que el Diseño de Experimentos es una herramienta clave para el Diseño de Parámetros [11], Taguchi puso especial énfasis en conseguir que el DoE fuera más sencillo de aplicar. Básicamente, Taguchi simplificó la aplicación del DoE incorporando: un conjunto estándar de diseños experimentales (matrices ortogonales), una herramienta gráfica para asignar los factores al diseño experimental (gráficas lineales), guías para interpretar los resultados (cookbook), maneras de transformar la respuesta para obtener reducción en la variación (S/N ratios), y un método formal para estudiar factores incontrolables utilizando la técnica de diseño robusto. Finalmente, simplificó el análisis de tolerancias con la utilización del DoE.

El principal aporte de Taguchi [12] fue su énfasis en la reducción de variabilidad. “La calidad es algo que no puede ser caracterizado solamente por una media de una característica deseada. La variabilidad de dicha característica debe ser considerada también”. Por ello, propuso la utilización de diseños especiales, en los cuales los factores incluidos en la experimentación podían ser clasificados en dos tipos: Control y Ruido. Los primeros incluyen aquellos factores que pueden ser controlables, mientras que los ruidos son aquellos difíciles o caros de controlar.

La idea básica del diseño de parámetros es identificar el nivel apropiado de los factores de control en los cuales el rendimiento del sistema es lo más robusto (insensible) posible a la presencia de los factores ruido. Como el objetivo es hacer el sistema robusto al ruido, este enfoque es conocido como “Diseño Robusto”.

Para mayores detalles del método de Taguchi se recomiendan los libros de Roy [13] y el Handbook de Taguchi [14].

### 2.3. Enfoque de Shainin

Se le llama Sistema Shainin<sup>TM</sup> a la metodología para la resolución de problemas creada por el ingeniero Dorian Shainin, que murió en 2000. Shainin describe su colorido método como el enfoque americano para la resolución de problemas, con los mismos objetivos que el enfoque de Taguchi [15].

Shainin consideraba sus ideas como propiedad intelectual, por lo que sólo las vendía a sus clientes para que ellos tuvieran una ventaja competitiva. Como el Sistema Shainin<sup>TM</sup> está legalmente protegido, sus métodos son raramente discutidos en la bibliografía. Keki R. Bhole fue autorizado a publicar información sobre estos métodos por única vez en un único libro.

Debido a que su compañía Motorola, fue galardonada con el premio de Excelencia de Calidad “Malcolm Baldrige”, dicho premio estipula que los métodos utilizados por la compañía premiada sean compartidos con otras compañías de USA [16]. El interés en sus métodos aumentó significativamente en 1991 con la primera edición de este libro (la segunda edición fue publicada en 2000 [16]).

Dorian Shainin incluyó varias técnicas, algunas nuevas y otras conocidas, en una estrategia coherente, la cual promueve el uso secuenciado de estas herramientas para obtener la mejora de los procesos [10].

Las ideas del enfoque de Shainin se basan en:

- **Principio de Pareto:** Entre todos los muchos factores que influyen en un proceso, existe un factor que es la principal causa de la variación de la respuesta. A este factor se le llama la Red X<sup>®</sup> y puede ser un factor o la interacción entre dos o más factores. Puede después haber una segunda o tercera causa significativa, las cuales se les denomina Pink X<sup>®</sup> y Pale Pink X<sup>®</sup> respectivamente.
- Shainin se opone fuertemente al uso de los diseños factoriales fraccionados. En lugar de utilizar dichos diseños que confunden las interacciones, propone identificar los factores que influyen en la variación y reducir la mayor parte de dicha variación, para alcanzar un número manejable de variables (tres o cuatro) con las cuales poder experimentar. Para experimentar **recomienda la utilización de diseños factoriales completos**.
- **“Habla con las partes. Son más inteligentes que los ingenieros”**<sup>4</sup>. Primero, recomienda “hablar” con las partes de la máquina o proceso. Luego, hablar con los trabajadores que están en la línea de producción. Finalmente, se debe recurrir al método menos productivo que es hablar con los ingenieros.

El Sistema Shainin<sup>TM</sup> presenta muchas herramientas que deben ser aplicadas en forma secuencial para obtener la resolución de los problemas buscados. Esta estrategia de resolución de problemas, puede ser dividida en tres grandes etapas: Generación de claves, DoE Formal y transición al Control Estadístico de Procesos (SPC). Se comienza la estrategia considerando todas las variables que puedan ser identificadas. Una vez listadas, el primer grupo de herramientas (Multi-Vary, Components Search<sup>TM</sup>, Paired Comparison<sup>TM</sup>, etc.) intentan generar claves para reducir el número de variables involucradas en el proceso. Dichas herramientas, se basan en la realización de experimentos on-line (sin parar la producción) analizando la variación de la respuesta. En una segunda etapa, la herramienta Variable Search<sup>TM</sup> es utilizada para experimentar secuencialmente (no aleatoriamente) off-line, basado en los conocimientos del proceso y en la búsqueda binaria. Con ello se consigue reducir aún más el número de variables involucradas, lo que permite la aplicación de diseños factoriales completos. Después, otras herramientas (B vs C<sup>TM</sup>, Response Surface, Scatterplots) son utilizados para confirmar y optimizar los resultados. Finalmente, en la última etapa, Positrol<sup>TM</sup>, Process Certification y Pre-Control son recomendados para garantizar que los resultados son sostenibles, o sea que los resultados obtenidos serán también obtenidos en el futuro.

### 3. Limitaciones de los diferentes enfoques

#### 3.1. Críticas al enfoque clásico

Hasta que los “Métodos de Taguchi” fueron divulgados en USA, el diseño de experimentos clásico era considerada una herramienta matemática, la cual era como un complemento a la formación técnica del ingeniero para el estudio de procesos y productos [9]. Taguchi y Shainin fueron los mayores críticos al enfoque clásico. Ellos sostenían que los empresarios, ingenieros y trabajadores hallaban el DoE demasiado complicado de aplicar e inefectivo, lo cual lo convertía en una experiencia frustrante [16]. Consecuentemente, este enfoque era preferido únicamente por aquellos con una inclinación matemática o estadística [17].

A pesar de ello, es importante destacar que después de una década de fuerte oposición a los nuevos enfoques, el enfoque clásico empezó a detectar la importancia de varias ideas propuestas por Taguchi y Shainin. Por ejemplo, hubo muchos intentos de integrar el diseño de Parámetros

---

<sup>4</sup> Talk to the parts, they are smarter than engineers!

de Taguchi con el enfoque clásico. Como consecuencia, el uso de la metodología de Superficie de Respuesta cuando se desea una reducción de la variación se convirtió en un área de mucha investigación [18, 19].

Finalmente la complejidad de la técnica, criticada fuertemente, fue disminuida significativamente con la ayuda de software que permite diseñar y analizar los experimentos. Además, se dedicó especial énfasis en presentar guías que incluyeran herramientas gráficas para clarificar y simplificar el DoE. Algunos ejemplos de estas simplificaciones, son las gráficas de Pareto para ver la magnitud de los efectos o el uso de gráficos Multi-Vary para definir correctamente el problema de estudio.

### 3.2. Críticas al enfoque de Taguchi

Hubo un gran debate sobre los métodos de Taguchi en la primera década posterior a la aparición de los mismos [12, 20-22]. Los métodos de Taguchi fueron criticados por ser ineficientes y muchas veces inefectivos. Shainin fue muy crítico con Taguchi, derrumbando lo que la gente creía como el “arma súper-secreta japonesa” [15].

Nair [21] identifica tres grandes grupos de críticas al trabajo de Taguchi: a) El uso de ratios Señal/Ruido (S/N) como respuesta, b) Sus herramientas para analizar los experimentos, c) su selección de diseños experimentales. En primer lugar, muchos criticaron los ratios S/N como medida para el análisis. También, hubo muchas críticas a las nuevas herramientas propuestas por Taguchi para analizar los experimentos, ya que la mayoría de estas técnicas son difíciles y menos efectivas que las ya existentes. Un ejemplo claro es el método de análisis de acumulación (accumulation analysis). Finalmente, pero muy importante, es la crítica a los diseños experimentales propuestos. En primer lugar, las “matrices ortogonales” de Taguchi fueron criticadas fuertemente ya que llevaban a subestimar las interacciones<sup>5</sup>. En respuesta, a estas críticas Taguchi comentaba [23]: “Una persona que no crea en la existencia de efectos no lineales, es una persona que está fuera de la realidad”. A pesar de ello, creía que eligiendo una buena respuesta (métrica), era posible con la habilidad y conocimiento de los ingenieros decidir los niveles de los factores (llamados sliding levels) para lograr que la mayoría de las interacciones sean insignificantes. Desgraciadamente, existe mucha evidencia en la bibliografía sobre Taguchi, que las interacciones deben ser evitadas. Esto es principalmente debido a sus seguidores y no a su creador [9].

Por otro lado, están los “diseños cruzados” propuestos por Taguchi para estudiar simultáneamente la media y la varianza de una respuesta. Estos diseños también fueron criticados, ya que generalmente requieren de muchos experimentos y además no permiten la estimación de las interacciones entre los factores de control. Por ello, Welch [24] entre otros, propuso el uso de diseños combinados para la reducción de la cantidad de experimentos.

Últimamente hubo mucho debate en este tema, y aún no está claro cual de las dos aproximaciones es mejor cuando se desean estudiar la varianza y la media. Por ejemplo, Pozueta et al. [25] y Kunert et al. [26] mostraron como los diseños clásicos (combinados) son muchas veces peores que los diseños de Taguchi (cruzados).

A pesar de que los estadísticos y académicos clásicos reconocieron valor en las ideas de Taguchi y las adaptaron a su enfoque, los seguidores de Taguchi y él mismo, no reconocieron

---

<sup>5</sup> Muchas de las matrices ortogonales de Taguchi son factoriales fraccionados. El problema principal es que la resolución elegida es generalmente baja (III o IV).

nunca los errores de su método, por lo que siguen sosteniendo la efectividad de los métodos en su forma original.

### **3.3. Críticas al enfoque de Shainin**

Como el Sistema Shainin™ está protegido por ley, la única forma de aprender completamente la técnica es yendo a sus clases. La otra alternativa posible es leer el libro de Bhote [16]. Lamentablemente, este libro está escrito con un tono hiperbólico, demasiado optimista, excesivamente tendencioso y muchas veces deshonesto intelectualmente intentado probar que los métodos de Shainin son muy superiores a los otros enfoques. Por ejemplo, el libro expresa que: “Están tan convencidos del poder del enfoque de Shainin para DoE que fijan un desafío. Cualquier problema que pueda ser resuelto por el enfoque clásico o de Taguchi, puede ser resuelto mejor, más rápido y más barato con el enfoque de Shainin”. Además, expresa que es 5 veces más eficiente que el método de Taguchi y más de 3 veces que el enfoque clásico.

A pesar de que hay muy poco escrito en la bibliografía sobre los métodos de Shainin, el material existente es suficiente para recolectar fuertes críticas a su sistema. Las herramientas más criticadas son el Variable Search™ [23, 27-29] y el Pre-Control™ [29, 30]. El Variable Search™ tiene mucho parecido con el costoso y poco fiable método de un-factor-por-vez (OFAT).

Además, esta herramienta se basa fuertemente en los juicios ingenieriles. Su debilidad reside en la habilidad y conocimientos necesarios que se requieren para llevar a cabo dos tareas: identificar correctamente todas las variables con las cuales experimentar y segundo ordenar las variables por importancia para la experimentación [27]. En segundo lugar, el Pre-Control es presentado como una alternativa al control estadístico de procesos (SPC), pero no lo es. En particular, el Pre-Control™ se comporta muy mal con procesos con bajo rendimiento [30].

Una revisión y discusión reciente del Sistema de Shainin es presentada por Steiner et al. (2008) [29, 31], la cual provee mayores detalles sobre el Sistema Shainin y sus limitaciones.

### **Conclusiones**

Los tres enfoques más conocidos y divulgados sobre el Diseño de Experimentos (DoE) fueron presentados. Cualquiera de los tres enfoques es mucho más eficiente que la estrategia de un-factor-a-la-vez (OFAT). Por ello la obtención de buenos resultados con un enfoque, no prueba que ese enfoque sea el único para mejorar la calidad y menos aún que sea el mejor. Por eso basado en nuestras experiencias e investigaciones se darán algunos consejos para determinar cuando son útiles los conceptos de cada enfoque.

En primer lugar, se debe estar agradecido a Shainin, por la importancia de su divulgación en las empresas de la utilidad del DoE. A pesar de que sus métodos son fáciles de aprender, que en parte se debe a que su experimentación está basada en una leve modificación del OFAT, estos sistemas no presentan una alternativa seria a los otros enfoques al DoE. Tanto el enfoque clásico como el enfoque de Taguchi son estadísticamente más válidos y más robustos. Los métodos de Shainin pueden tener utilidad en procesos de mediano-alto volumen para los cuales un nivel alto de calidad fue alcanzado. Además, pueden ser utilizados cuando la respuesta es binaria (por ejemplo, una máquina funciona o no) y las razones detrás de las distintas respuestas pueden ser muchas (decenas o cientos) variables.

En segundo lugar, es importante destacar la importante contribución de Taguchi al área de la “filosofía” de calidad y a las metodologías de ingeniería, que incluyen la función de pérdida de calidad y los diseños robustos. Los métodos de Taguchi tienen el potencial de lograr mejoras en

los procesos industriales. A pesar de ello, debido a las imperfecciones técnicas el éxito no puede ser asegurado para todos los casos. Como regla general, no se recomienda el uso de los métodos de Taguchi a no ser que se desee analizar dos tipos de problemas: Análisis de Tolerancias o conseguir la robustez frente a factores ruido de los procesos y productos. En ambos casos, también se puede aplicar el enfoque clásico, por lo que se deben evaluar cada condición concreta.

Los dos nuevos enfoques al DoE fueron una reacción a la complejidad existente de la técnica para aplicarla en la industria. Ambos enfoque fueron autoproclamados como métodos sencillos y efectivos. No obstante, la aparición de ambas enfoques creo que el enfoque clásico fuera más desarrollado e incorporara muchas de las ideas ingenieriles de Shainin y Taguchi. Además la aparición de software y herramientas gráficas simplificó la aplicación del DoE. Por tanto, salvo las excepciones anteriormente mencionadas se recomienda para usuarios no expertos la utilización del DoE clásico para sus experimentaciones.

### **Bibliografía**

- Tanco, M., E. Viles, and L. Pozueta, *Comparing different approaches for Design of Experiments (DoE)*, in *Advances in Electrical Engineering and Computational Science*, S. Netherlands, Editor. 2009, Springer.
- Anderson, M.J., Trimming the Fat out of Experimental Methods. *OE Magazine*, 2005. 5(6): p. 32-33.
- Fisher, R.A., *The Design of Experiments*. 1935, New York: John Wiley.
- Montgomery, D.C., *Design and analysis of experiments*. 6 ed. 2005: Willey.
- Box, G.E.P. and K.B. Wilson, On the Experimental Attainment of Optimum Conditions. *Journal of the Royal Statistical Society*, 1951. Series B(13): p. 1-45.
- Booker, B.W. and D.M. Lyth, Quality Engineering from 1988 through 2005: Lessons from the past and trends for the future. *Quality Engineering*, 2006. 18(1): p. 1-4.
- Taguchi, G., *Introduction to Quality Engineering*. 1986, New York: UNIPUB/kraus International: White Plains.
- Taguchi, G., *System of Experimental Design: Engineering Methods to Optimize Quality and Minimize Cost*. 1987, New York: UNIPUB/Kraus International: White Plains.
- Goh, T.N., Taguchi Methods: Some technical, Cultural and Pedagogical perspectives. *Quality and Reliability Engineering International*, 1993. 9(3): p. 185-202.
- De mast, J., A methodological comparison of three strategies for quality improvement. *International Journal of Quality and Reliability Management*, 2004. 21(2): p. 198-212.
- Arvidsson, M. and I. Gremyr, Principles of Robust Design Methodology. *Quality and Reliability Engineering International*, 2008. 24(1): p. 23-35.
- Robinson, T.J., C.M. Borrer, and R.H. Myers, Robust Parameter Design: A review. *Quality and Reliability Engineering International*, 2004. 20(1): p. 81-101.
- Roy, R.K., *Design of Experiments using the Taguchi approach: 16 steps to product and process improvement*. 2001: Wiley.
- Taguchi, G., S. Chowdhury, and Y. Wu, *Taguchi's Quality Engineering Handbook*. 1rst edition ed. 2004: Wiley-Interscience. 1696.
- Shainin, D. and P. Shainin, Better than Taguchi Orthogonal tables. *Quality and Reliability Engineering International*, 1988. 4(2): p. 143-149.
- Bhote, K.R. and A.K. Bhote, *Word Class Quality. Using Design of Experiments to make it happen*. 2nd Edition ed. 2000, New York: Amacom.

- Tay, K.-M. and C. Butler, Methodologies for experimental design: A survey, comparison and future predictions. *Quality Engineering*, 1999. 11(3): p. 343-356.
- Vining, G.G. and R.H. Myers, Combining Taguchi and Response Surface Philosophies: A dual response approach. *Journal of Quality Technology*, 1990. 22(1): p. 38-45.
- Quesada, G.M. and E. Del Castillo, A dual response approach to the multivariate robust Parameter Design problem. *Technometrics*, 2004. 46(2): p. 176-187.
- Pignatello, J. and J. Ramberg, Top ten triumphs and tragedies of Genichi Taguchi. *Quality Engineering*, 1991. 4(2): p. 211-225.
- Nair, V.N., Taguchi's Parameter Design: A panel discussion. *Technometrics*, 1992. 31(2): p. 127-161.
- Box, G.E.P., S. Bisgaard, and C. Fung, An explanation and critique of Taguchi's contribution to quality engineering. *International Journal of Quality and Reliability Management*, 1988. 4(2): p. 123-131.
- Logothetis, N., A perspective on Shainin's approach to experimental design for quality improvement. *Quality and Reliability Engineering International*, 1990. 6(3): p. 195-202.
- Welch, W.J., et al., Computer Experiments for Quality Control by Parameter Design. *Journal of Quality Technology*, 1990. 22(1): p. 15-22.
- Pozueta, L., X. Tort-Martorell, and L. Marco, Identifying dispersion effects in robust design Experiments - Issues and Improvements. *Journal of Applied Statistics*, 2007. 34(6): p. 683-701.
- Kunert, J., et al., An experiment to compare Taguchi's product array and the combined array. *Journal of Quality Technology*, 2007. 39(1): p. 17-34.
- Thomas, A.J. and J. Antony, A comparative analysis of the Taguchi and Shainin DoE techniques in a aerospace environment. *International Journal of Productivity and Performance Management*, 2005. 54(8): p. 658-678.
- Ledolter, J. and A. Swersey, Dorian Shainin's Variables Search procedure: A critical Assessment. *Journal of Quality Technology*, 1997. 29(3): p. 237-247.
- De mast, J., et al., Discussion: An overview of the Shainin System™ for Quality Improvement. *Quality Engineering*, 2008. 20(1): p. 20-45.
- Ledolter, J. and A. Swersey, An Evaluation of Pre-Control. *Journal of Quality Technology*, 1997. 29(2): p. 163-171.
- Steiner, S.H., J. MacKay, and J. Ramberg, An overview of the Shainin System™ for Quality Improvement. *Quality Engineering*, 2008. 20(1): p. 6-19.