



Uso del diseño de experimentos para la innovación empresarial

DELGADO FERNÁNDEZ, MERCEDES

Escuela Superior de Cuadros del Estado y del Gobierno (ESCEG) (La Habana, Cuba)

Correo electrónico: mercedes@esceg.cu

RESUMEN

El artículo aborda el uso del diseño de experimentos en proyectos de innovación empresarial. En primer lugar, se plantean las bases del diseño experimental con especial énfasis en el enfoque de procesos y su aplicabilidad en la innovación. En segundo lugar, propone una guía para su aplicación tanto en proyectos de innovación empresarial, como de productos, procesos, organizacional y de comercialización. La información inicial para la aplicación de la guía se basa en el diagrama causa efecto. Finalmente, se muestran tres casos de estudio de proyectos de innovación empresarial en los que se aplica la guía de diseño de experimento, que permite decidir cuáles son los factores o causas que influyen en la variable respuesta, en correspondencia con el efecto analizado. De esta forma el directivo de la empresa tiene más conocimiento para tomar decisiones que contribuyan al incremento de la eficacia y la eficiencia.

Palabras clave: diseño de experimentos, análisis de varianza, diagrama causa-efecto, innovación empresarial.

Clasificación JEL: C4; C9; O3.

MSC2010: 62Kxx; 62K15.

Use of experiments design for business innovation

ABSTRACT

The article deals with the use of experimental design in business innovation projects. Firstly, the foundations of experimental design are presented, with special emphasis on the process approach and its applicability in innovation. The second section proposes a guide for its application in business innovation projects, such as products, processes, organizational and marketing. The initial information for the application of the guide is based on the cause-effect diagram. Finally, three case studies of business innovation projects are presented in which the experiment design guide is applied, by means of which it is decided which factors are related to the causes that influence the response variable in correspondence with the analyzed effect. In this way, the manager of the company would have more knowledge to make decisions that contribute to the increase of efficacy and efficiency.

Keywords: design of experiments, analysis of variance, cause-effect diagram, business innovation.

JEL classification: C4; C9; O3.

MSC2010: 62Kxx; 62K15.



1. Introducción.

En el ámbito organizacional, el diseño de experimentos puede ser útil para ayudar a caracterizar los procesos de la ciencia y la tecnología (Deming & Morgan, 1993; Klauss & Kempthorne, 2008), en la valoración del uso de las tecnologías de gestión de procesos (Weber, Mutschler & Reichert, 2010), la influencia del conocimiento y la motivación en la innovación organizacional (Eardley & Uden, 2011) y de conjunto con otros métodos del control estadístico de la calidad, para la mejora de la calidad.

Aunque se amplía su uso, aún no se aprovechan todas sus potencialidades en el ámbito empresarial. Por una parte, existe una falsa creencia de que el diseño de experimento es más conveniente para las áreas de Investigación y Desarrollo (I+D) y que está restringido a la disponibilidad de recursos para medir los efectos combinados de los factores de interés. Por ejemplo, se recomienda no invertir más del 25% de los recursos de la experimentación en el experimento inicial, lo que presupone un accionar iterativo para el aprendizaje (Montgomery, 2013).

Por otra parte, las insuficiencias existentes en el registro y análisis de los datos, el desconocimiento sobre esta metodología y su utilidad, así como la relativa complejidad del método son otras razones que han provocado la no difusión de los diseños experimentales en la industria e incluso en algunos servicios. Se reconoce que su uso en los sectores no manufactureros implica mayores retos a vencer (Antony, 2014).

Una limitación en el uso extensivo del diseño de experimentos en el ámbito social, organizacional y empresarial, lo constituyen las exigencias del método en relación al conocimiento del problema a investigar, de las condiciones a comparar, las variables de salida, los factores y los datos a recopilar, que no siempre es posible contar con ellos a priori. A pesar de estas limitaciones, la capacidad que tiene el software de aplicar los métodos estadísticos y procesar elevados volúmenes de información, facilita el empleo del método de diseño de experimentos para la solución de problemas en un proceso iterativo de aprendizaje y de descubrimiento (Box, Hunter & Hunter, 2005). La recopilación de datos mediante pruebas teóricas y simulaciones es útil, aunque algunos resultados desconcierten la teoría, incluyendo los diseños cuasi-experimentales, cuya eficiencia es menor que la de los experimentos reales (Campbell & Stanley, 1963). Los resultados y ejemplos de la identificación automática de los diseños cuasi-experimentales demuestran el potencial de este campo en la actualidad, sobre todo en grandes bases de datos (Jensen, Fast, Taylor & Maier, 2008).

Los métodos estadísticos de diseño de experimentos podrían tener más aplicaciones bajo determinadas condiciones en el proceso de toma de decisiones empresarial. Por ejemplo, en la evaluación y selección de proveedores y tecnologías, en la compra de una nueva materia prima, en el análisis de la calidad del producto, en la selección y evaluación del personal, en la valoración de diferentes causas como la accidentalidad en un puesto de trabajo, en el diseño de productos, entre otros. Muchas de estas decisiones sobre materias primas, tecnologías, recursos humanos, productos y calidad, entre otras tantas, se toman en las empresas en ocasiones sin ningún tipo de análisis estadístico.

Los diseños de experimentos se pueden emplear para comparar dos o más tratamientos, estudiar el efecto de varios factores sobre la(s) respuesta(s), determinar el punto óptimo de operación del proceso, la optimización de una mezcla y para hacer el producto o proceso insensible a factores no controlables (Gutiérrez & de la Vara, 2008). Se le reconoce su utilidad en la ingeniería para mejorar el rendimiento de un proceso de manufactura, en el desarrollo de nuevos procesos y productos (Montgomery, 2013). De esta forma, es frecuente su uso en el diseño y rediseño de productos y procesos y en la propia planificación y mejora de la calidad. Puede ser una de las técnicas a emplear para realizar cambios en los procesos y evaluar el cumplimiento de

los objetivos de calidad proyectados. Se usa en el ciclo de Deming (o Shewart) de Planear-Hacer-Verificar-Actuar, para la mejora o en estudios de simulación (Salazar & Baena, 2009).

Por otra parte, las organizaciones deben poseer como filosofía una tendencia al incremento de la innovación, como vía para aumentar sus niveles de calidad y competitividad (Delgado, 1998). En la valoración de los cambios que se proyectan para generar la innovación puede ser de utilidad el diseño de experimentos.

La innovación puede ser de producto o servicio, de procesos, organizacional o de comercialización (OCDE & Eurostat, 2006). Los diferentes tipos de innovaciones están estrechamente relacionados entre sí e impactan en la eficiencia y la eficacia.

Este artículo propone emplear la información histórica disponible y requerida para la generación de la innovación empresarial, estructurándola como un diseño de experimento, según los objetivos que se persigan en el análisis a realizar, y a la vez sus resultados permitirán conocer mejor el objeto de estudio. El artículo tiene como objetivo mostrar la utilidad del diseño experimental en la evaluación, generación y proyección de la innovación, con su contribución en la toma de decisiones empresariales.

En primer lugar, se plantean los fundamentos del diseño experimental con especial énfasis en el enfoque de procesos y su aplicabilidad en la innovación. En segundo lugar, propone una guía para su aplicación en proyectos de innovación empresarial, ya sean de productos, procesos, organizacional y de comercialización.

A través de casos de estudio reales se muestran en el siguiente apartado diferentes usos del diseño de experimentos para la selección de las mejores condiciones de los factores que influyen en las empresas objetos de estudio y con ello el incremento de la eficacia y la eficiencia, según los objetivos y variables definidas.

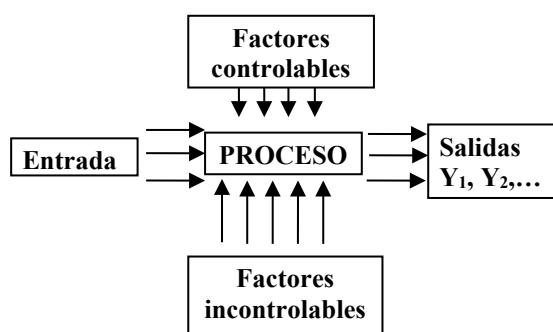
2. Fundamentos del diseño de experimentos con enfoque a procesos para la innovación.

El diseño de experimento se define como una estrategia de planificación de experimentos tal que las conclusiones válidas y relevantes puedan ser eficientes y económicamente enriquecidas (International Standardization Organization, 2015). Se define habitualmente como una prueba o serie de pruebas donde se inducen cambios deliberados en los factores para observar y analizar los cambios en la respuesta de salida (Peña, 1992). Esta definición se adapta al ámbito empresarial, ya que en muchas ocasiones existen diferentes alternativas entre las que se debe decidir cuál es la que agrega mayor valor a los procesos y productos o cuáles son las que satisfacen determinadas restricciones u objetivos de la organización. La figura 1 representa el proceso, entendido como aquél que transforma entradas en salidas en presencia de factores controlables e incontrolables (Montgomery, 2013).

Las salidas pueden ser medidas a través de diferentes variables como resistencia a la tracción, la productividad, el rendimiento agrícola, la satisfacción de los clientes, características de calidad del producto final, ventas, utilidades, etc. A su vez, en un mismo proceso puede ser de interés medir varias características a la salida.

Los factores controlables son aquellas variables de las que se quiere estudiar su posible incidencia en la(s) salida(s) o variables, como lo pudiera ser el tipo de materia prima, proveedor, trabajador, equipo de trabajo, la unidad empresarial, los meses, etc. Hay que tener en cuenta que en ocasiones se requiere controlar en una prueba algunos de los factores incontrolables. En este artículo, las variables de interés, sean las de salida o los factores a controlar, se relacionan con la innovación de productos, procesos, organizacional y de comercialización.

Figura 1. Proceso en el diseño de experimento.



Fuente: Elaboración propia.

Un proceso es un conjunto de actividades mutuamente relacionadas o que interactúan, las cuales transforman elementos de entrada en resultados con el fin de satisfacer las necesidades para las que van dirigidas esas salidas (NC ISO 9001, 2015).

En el enfoque a procesos, las diferentes fuentes de variación necesitan ser entendidas, dado que cada respuesta, efecto o salida refleja la variabilidad relacionadas con (Barrentine, 1999):

- a) el conocimiento de las variables de entrada,
- b) las variables desconocidas del proceso y/o
- c) la medición de la variable respuesta.

Las materias, energía e información pueden constituir fuentes de variación a ser investigadas en un experimento, en relación a su influencia en las variables de salida de ese proceso y en los procesos posteriores (NC ISO 9001, 2015).

En la adopción del enfoque basado en procesos, el diseño de experimento puede ser útil al facilitar la identificación de cuáles son las mejores condiciones de las entradas y los factores para generar las mejores salidas. Por ejemplo, puede contribuir al aumento de la satisfacción del cliente mediante el análisis del cumplimiento de sus requisitos y a un uso más racional y eficiente de los recursos en una organización, al evaluar las mejores condiciones de los mismos. En ambas situaciones se pueden mejorar la eficacia y la eficiencia empresarial.

Existen dos formas básicas de obtener información sobre los factores que afectan a un proceso: observar el proceso sin modificarlo, o experimentar en el proceso, haciendo cambios y estudiando sus consecuencias. La primera forma se refiere en mayor medida al análisis de los datos para extraer toda la información que hay en los mismos y en cierta forma es la que más se ha venido aplicando en el ámbito empresarial. La toma de decisiones debe hacerse basada en la evidencia, para lo cual el análisis de los datos contribuye a tal fin. La segunda forma constituye la base del diseño de experimentos, aplicado para generar eficientemente datos que contengan la información de interés. En este artículo se recomienda analizar la variabilidad a partir del comportamiento de los datos históricos, según objetivos determinados en relación a la proyección de la innovación.

En estudios experimentales las variables de interés frecuentemente pueden ser controladas y fijadas a valores predeterminados para cada corrida del experimento, mientras que en los observacionales muchas de las variables de interés no pueden ser controladas, pero pueden ser registradas y analizadas (Mason, Gunst & Hess, 2003).

Las investigaciones hechas en un laboratorio generalmente son experimentales pero los estudios sociales son esencialmente de naturaleza observacional, aunque pueden tener algún

enfoque experimental, como los procesos industriales (Cox & Reid, 2000), en los que se realizan intervenciones de diferentes tipos de implicaciones al pensamiento estadístico por su universalidad (Daniel, 1976).

La investigación que produce innovación y sostiene su desarrollo ha sido llamada diseño de innovación, siendo aquella que produce hallazgos que se retroalimentan en ciclos iterativos del diseño innovador (Bareiter, 2002), para lo cual el diseño de experimentos puede ser útil. Existen dos argumentaciones sobre el valor del diseño de innovaciones: las científicas que involucran conocimiento y las sustantivas que involucran el cambio y requieren un plan (Schwartz & Lee, 2005).

Una de las vías prácticas recomendadas para el proceso de innovación son los programas de investigación que coordinan diseños ingenieriles de experimentos en laboratorios con psicólogos, que permiten identificar los principales efectos de los componentes e interacciones, para luego correlacionarlos y construir el modelo cognitivo de los componentes (Schunn, Paulus, Cagan & Wood, 2006).

En un ambiente de ingeniería los experimentos son frecuentemente conducidos para explorar, estimar y confirmar (Antony, 2014). La exploración se refiere al entendimiento de los datos de los procesos, la estimación es para determinar los efectos de las variables o factores de los procesos sobre las características de las salidas y la confirmación implica verificar los resultados predichos obtenidos del experimento.

A la vez, el diseño de experimentos tiene dos perspectivas: prospectiva y reflexiva, que resultan en el diseño iterativo (Cobb, Confrey, diSessa, Lehrer & Schauble, 2003). Un diseño de experimentos es una forma de investigación intervencionista que crea y evalúa condiciones novedosas para el aprendizaje (Schwartz & Lee, 2005) y la generación de conocimiento.

Un concepto también descrito en la literatura es el pensamiento de diseño, que se entiende como una forma de pensar que conduce a la transformación, la evolución y la innovación, a nuevas formas de gestionar los negocios y, en este sentido, tiene mucho que ofrecer a la gestión de la innovación; lo que aún no está claro para muchos gerentes es el valor agregado de este enfoque para la innovación en la práctica, y cómo evaluar y elegir el camino más efectivo (Tschimmel, 2012). El pensamiento de diseño se convierte en una metodología de solución de problemas adaptada a los desafíos a los que se enfrentan las organizaciones empresariales para fomentar la innovación y el crecimiento, orientando así a los tomadores de decisiones a reducir sus sesgos cognitivos a nivel individual (Liedtka, 2015).

El paradigma de investigación basado en el diseño ha demostrado un potencial considerable y plantea relaciones sinérgicas entre la investigación, el diseño y la ingeniería a través de la participación activa de los investigadores en los procedimientos de aprendizaje y enseñanza, así como de los procesos científicos de descubrimiento, exploración, confirmación y difusión (Wang & Hannafin, 2005).

El trabajo empírico en la economía ha mejorado en los últimos 20 años principalmente por las mejoras en los diseños de la investigación, ya sea en virtud de una experimentación directa o mediante la implementación cuidadosa de los métodos cuasi-experimentales, logrando éxitos en los resultados alcanzados por los responsables de la formulación de las políticas y los teóricos económicos, imaginándose todo lo que podría aprenderse si se tratara de romper las barreras entre los campos de conocimientos de la macroeconomía y la organización industrial (Angrist & Pischke, 2010).

Las capacidades en diseño constituyen fuentes importantes de ventaja competitiva y su fiabilidad en apoyo a la innovación debe demostrarse mediante múltiples aplicaciones en estudios de casos reales (Cantamessa, Montagna & Cascini, 2016).

Otros aspectos que se requieren identificar, pueden referirse a la provisión de conocimientos de las entradas de los procesos de innovación, la identificación de demandas, el soporte a los elementos del sistema de innovación y los servicios de soporte a las empresas para innovar (Edquist, 2016). Las técnicas cualitativas permiten conocer las competencias innovativas de los trabajadores, contribuyendo al campo de la creatividad organizacional y la productividad (Olugbenga, 2016).

Así, el diseño de experimento se puede aplicar a un proceso o cadena de procesos, identificando los factores y niveles que contribuyan a la innovación, ya sea de procesos, productos, servicios y comercial.

3. Guía para la aplicación del diseño de experimentos en la innovación empresarial.

Innovar incluye el proceso de convertir ideas en productos, procesos o servicios nuevos o mejorados en la práctica social (Delgado, Pino, Solís & Barea, 2008), para generar resultados en función de los objetivos trazados (Delgado, 2016). Implica un éxito, con un factor de diferenciación, que puede incluso ser consigo mismo. En este concepto de innovación es viable el uso del diseño de experimentos, en la medida que sea posible valorar las alternativas de cambios, según los objetivos previstos y los resultados alcanzados.

El diseño de experimentos estudia el efecto que, sobre una variable respuesta, tienen un conjunto de otras variables que se pueden llamar experimentales, factores o tratamientos (Peña, 1992), así como las relaciones causales entre variables independientes y dependientes. El experimento que se genere tendrá en cuenta su contribución a la innovación, utilizando los datos existentes y accesibles de la realidad.

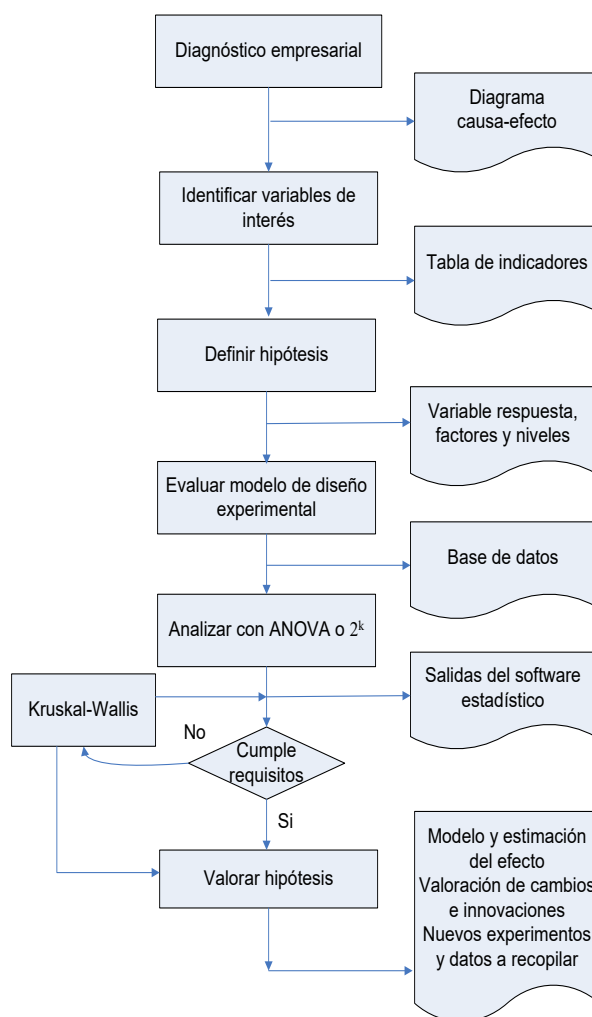
La innovación es a la vez una actividad muy compleja y heterogénea con diferentes factores y condicionantes, tanto internos como externos a una organización, sector, región y país. En este sentido, el diseño de experimentos puede contribuir a la evaluación de las alternativas diferenciadoras y la identificación de las condicionantes requeridas para la generación de la innovación.

La guía para el uso del diseño de experimentos en apoyo a la proyección de la innovación en el sistema empresarial se ha empleado desde hace 6 años y se muestra en la figura 2. La flexibilidad de la guía está dada por las diversas aplicaciones en las que se puede emplear, desde casos más sencillos hasta otros en los que se requiere un conocimiento más profundo del problema y del método.

La medición de la innovación permite una mejor toma de decisiones (Delgado, Esmeraldo & Oliveira, 2002), empleándose para ello técnicas como el diagrama causa-efecto, análisis de las barreras, la estadística, indicadores económicos, entre otros (Delgado, 2018), que propician la identificación de oportunidades de innovaciones.

Es aconsejable resumir toda la información del diagnóstico empresarial en un diagrama causa-efecto o espina de pescado (Ishikawa, 1986). En este diagrama, se identifican las variables de interés, siendo aquellas que más se vinculan con la problemática objeto de estudio, y de las que se dispongan de datos históricos suficientes o que sean fáciles de experimentar y registrar la información para su análisis. Posteriormente se elabora la tabla con los indicadores, entre los que se encuentran los relacionados con la gestión económico-financiera, el análisis de encuestas de satisfacción de los clientes, el comportamiento de las características de la calidad, los parámetros de la tecnología, del mercado, el recurso humano, la logística, la organización, etc.

Figura 2. Guía del diseño de experimentos para la innovación empresarial.



Fuente: Elaboración propia.

Las hipótesis a probar dependerán de los objetivos que se persiguen en la empresa y las variables de interés definidas, en relación a la proyección de un cambio o innovación empresarial. Para la identificación de los factores y las variables, además del diagrama causa-efecto podrían usarse otras técnicas como el despliegue de la función de la calidad, el análisis modal de fallos y efectos, la matriz de no conformidades (Farooq, Nóvoa, Araújo & Tavares, 2015), así como matrices de impacto de las subcausas sobre el efecto con el empleo de expertos (Delgado, 2017). Entre las variables seleccionadas se identifican la variable respuesta, que deberá proveer información útil acerca del objeto de estudio, que por lo general es un indicador o más que mide el efecto. La variable respuesta tiene como requisito que sea medible y se disponga de datos asociados a los factores (causas) seleccionadas o pueda disponerse fácilmente de los datos con la experimentación.

Las otras variables de interés se relacionan con las causas, que son los factores a los que se definen los intervalos de dicha variación y se fijan los niveles a los que se tomará información histórica para su análisis o se hará el experimento. La elección de los niveles depende de los intereses que se tengan al hacer variar las condiciones a las que se somete el factor o pueda estar sometido, en el futuro, si se fuesen a evaluar nuevas condiciones.

El método a seleccionar, muchas veces queda restringido por los datos disponibles, ya que no siempre se poseen suficientes datos de todos los factores, niveles y tratamientos deseados a

investigar. Se aconseja iniciar los diseños por los más fáciles, siendo el mínimo posible el de dos factores, y es aconsejable que haya réplicas. El diseño 2^k , es decir k factores a analizar, todos a dos niveles, es una buena estrategia para iniciar las corridas experimentales. El modelo depende de la cantidad de factores. Para dos factores A y B sería: $Y_{ij} = \mu + A_i + B_j + (AB)_{ij} + e_{ij}$. El e_{ij} se refiere al error residual.

Los métodos paramétricos empleados en esta guía son los del Análisis de varianza (ANOVA) y el 2^k , lo que dependerá de los factores y niveles definidos. El ANOVA es útil para la comparación de medias y así poder concluir acerca de si un determinado factor (docimado o estudiado) influye en el comportamiento de la respuesta (Montgomery, 2013). En ámbitos como la sociología, sicología, medicina, agricultura y la ingeniería el análisis exploratorio de los datos de conjunto con el ANOVA mejora el entendimiento en el análisis (Hoaglin, Mosteller & Tukey, 1991).

Otra cuestión a considerar al aplicar estos métodos paramétricos es la comprobación de los requisitos como la normalidad, la homogeneidad de varianza y la aleatoriedad de los residuos. Cuando se incumple el requisito de la normalidad o el de la homogeneidad de varianzas se pueden hacer algunas transformaciones a la variable respuesta como x^2 , $1/x$ y \sqrt{x} . En caso de persistir el incumplimiento de estos requisitos se procede a aplicar un método no paramétrico como el Kruskal-Wallis (Toutenburg & Toutenburg, 2009).

La valoración de las hipótesis permite conocer qué factores tienen un efecto significativo sobre la media de la variable respuesta, la existencia de interacciones significativas, cuáles serían los niveles o variantes recomendadas para los diferentes factores, en función de sus efectos sobre la media de la respuesta, así como la estimación de la media de la respuesta teniendo en cuenta las mejores condiciones encontradas. Se debe investigar la posible existencia de resultados anómalos o datos erróneos. Según los resultados se podría recomendar la realización de nuevos diseños de experimentos y la recopilación de datos para aclarar cuestiones o profundizar en el conocimiento de otros efectos importantes.

4. Resultados y análisis del diseño experimental en empresas.

Las aplicaciones de la guía se llevan a cabo en varias empresas cubanas, en las que se muestran las características de las variables y los factores analizados en diferentes proyectos de innovación (Delgado, 2018). En estos casos se muestran en detalle los pasos seguidos según la guía propuesta, destacando el objetivo, el efecto y la variable respuesta, las causas y la cantidad de subcausas que se desagregan, los factores y niveles estudiados, el modelo matemático del diseño de experimento, el análisis de los datos y la interpretación de los resultados.

Caso 1. Competitividad de una empresa de ingeniería y proyectos de la agricultura.

Objetivo: elevar la competitividad para contribuir a la eficiencia y eficacia del proceso inversionista.

Efecto: competitividad.

Variable respuesta que mide el efecto: tiempo total de ejecución de los servicios (días).

Causas: se identifican siete causas, 20 subcausas y 74 subsubcausas. Las causas son:

1. Soporte tecnológico.
2. Asimilación de la metodología BIM (Building Information Modelling).
3. Alianzas con proveedores.
4. Explotación de la carpeta de servicios.
5. Mercado y competencia.

6. Gestión del capital humano.
7. Regulaciones.

Se identifican factores de interés relacionados con las causas 2), 4), 5) y 6).

Factores: se seleccionan tres factores (A, B y C).

A: Tecnología (BIM, CAD).

- BIM: Building Information Modelling (Modelo de información de la edificación o la construcción).
- CAD: Design Assisted Computer (Diseño asistido por computadora).

B: Experiencia de los especialistas (UTP-10 y UTP+10). Se evaluó en Unidades Temporales de Proyecto (UTP).

- UTP-10: con experiencia promedio de los especialistas de 10 años o menos.
- UTP+10: con experiencia promedio de 10 años o más de los especialistas.

C: Complejidad (Alta, Media y Baja).

- Alta (1): mayor envergadura del trabajo con más cantidad de especialidades involucrados en su elaboración (6 o más especialidades). Se usaron servicios de ingeniería de diseño e instalación de almacenes mecanizados, con siete especialidades (Mecánica, Eléctrica, Arquitectura, Civil, Hidráulica, Automática y Presupuesto).
- Media (2): envergadura del trabajo media con la cantidad de especialidades involucradas de más de tres y menos de seis. Se usaron servicios de ingeniería de diseño e instalación de equipos y participaron cinco especialidades (Tecnológica, Mecánica, Eléctrica, Civil y Presupuesto).
- Baja (3): envergadura de trabajo baja con menor cantidad de especialidades involucradas. Se usaron servicios de ingeniería de diseño e instalación para la remodelación de redes tecnológicas de vapor directo con tres especialidades (Tecnológica, Civil y Presupuesto).

Datos y réplicas: se recopilaron datos históricos de un pilotaje realizado durante los años 2016 y 2017 de la unidad empresarial productiva de la región oriental de Cuba (ver Tabla 1).

Tabla 1. Datos recopilados del experimento.

Tecnología	Experiencia					
	Grupo No. 1		Grupo No. 2		Grupo No. 3	
	UTP-10	UTP+10	UTP-10	UTP+10	UTP-10	UTP+10
CAD	90	85	50	43	26	25
	86	89	54	49	30	25
	88	86	49	48	31	27
	90	88	52	44	28	24
BIM	58	56	36	34	19	18
	60	57	39	35	20	18
	56	55	38	34	21	17
	60	57	38	36	24	16

Fuente: Bergue (2018).

Modelo matemático (3 factores):

$$Y_{ijk} = \mu + A_i + B_j + C_k + (AB)_{ij} + (AC)_{ik} + (BC)_{jk} + (ABC)_{ijk} + e_{ijk}$$

Análisis de los datos e interpretación de los resultados

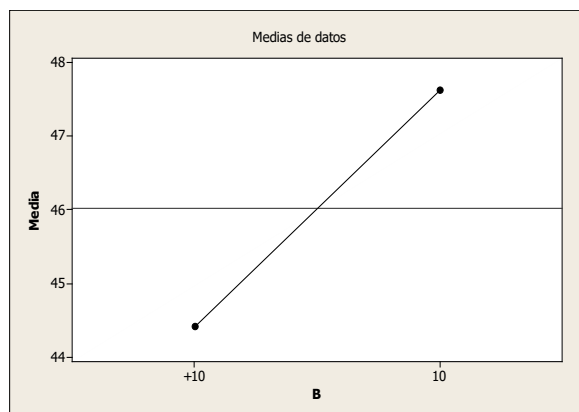
La Tabla ANOVA arroja los resultados siguientes:

Fuente	GL	SC	CM	F	P
A	1	3417,2	3417,2	1031,60	0,000
B	1	123,5	123,5	37,29	0,000
C	2	19910,2	9955,1	3005,31	0,000
A*B	1	0,5	0,5	0,16	0,694
A*C	2	1134,0	567,0	171,17	0,000
B*C	2	11,2	5,6	1,69	0,200
A*B*C	2	5,2	2,6	0,78	0,466
Error	36	119,3	3,3		
Total	47	24721,0			

Como efectos significativos en la ejecución de los servicios y proyectos de ingeniería se identifican, la tecnología (A), la experiencia (B) y la complejidad de las UTP (C), así como el efecto de la interacción de los factores AC, ya que el valor de P obtenido en esos casos son inferiores al α predeterminado de 0,05. Este valor P permite tomar la decisión de rechazar o aceptar la Hipótesis nula (H_0). Esta hipótesis se refiere a que no hay diferencias significativas entre los niveles del factor o la interacción que se analiza. El nivel de significación (α) es la probabilidad límite para tomar la decisión de rechazar H_0 cuando ella es cierta, es decir, es una probabilidad máxima de cometer error, y comúnmente se emplea el valor límite de 0,05. De esa forma se decide rechazar H_0 si el valor P es menor o igual a 0,05 y de lo contrario se acepta H_0 .

Las figuras 3 y 4 muestran el efecto principal de B y los de la interacción AC respectivamente. En el caso del factor B se concluye que el tiempo de entrega del servicio es menor para los especialistas de mayor experiencia, lo cual es lógico de esperar. Para la combinación de AC el menor tiempo de ejecución del proyecto y servicio de ingeniería se alcanza con la complejidad alta. En el caso de los proyectos de mayor complejidad (1) la diferencia entre el CAD y el BIM es de casi 30 días, recomendándose la asimilación del BIM.

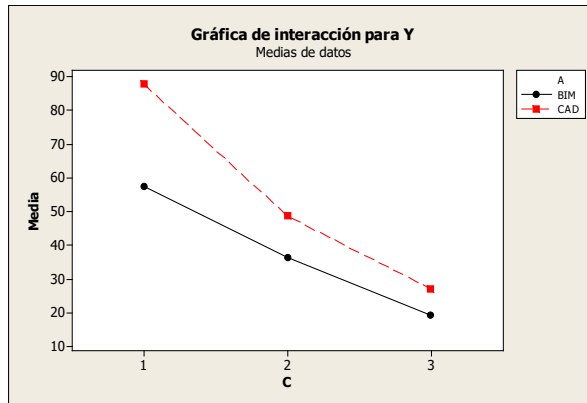
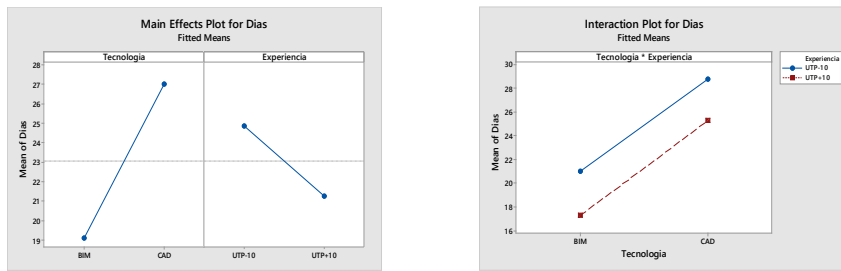
Figura 3. Gráfico de efectos principal de B.



Fuente: Elaboración propia.

Los resultados corroboran la tendencia de esta tecnología en el mundo, aunque estos niveles de productividad varían con el tamaño y tipo de empresa. El aumento de la productividad reportada en la literatura con el empleo del BIM es de aproximadamente un 50% respecto al CAD, y en algunos casos este valor se puede extender a cerca de un 80%, estando la media entre 55% y 65% (Bergue, 2018).

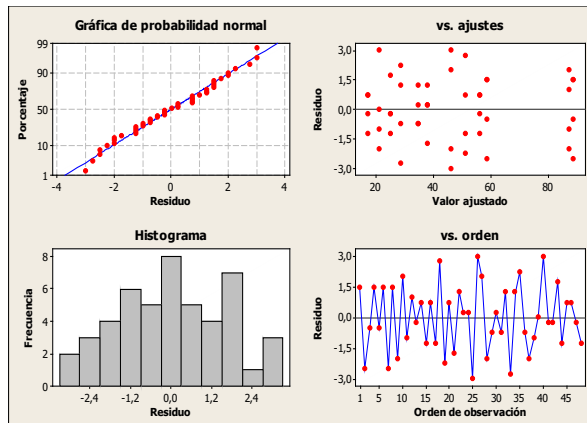
Figura 4. Gráfico de interacciones AC.



Fuente: Elaboración propia.

En la figura 5 se observa que se cumplen los requisitos de normalidad, homogeneidad e independencia de los residuos, por lo que las conclusiones con el ANOVA son válidas.

Figura 5. Gráfico de residuos.



Fuente: Elaboración propia.

Con los resultados obtenidos se tomó la decisión de acometer el proyecto de innovación para la asimilación y generalización en la empresa de proyectos de ingeniería y servicios de la tecnología BIM (Bergue, 2018). Con el uso del BIM se obtienen ventajas competitivas al realizar los servicios en un menor tiempo, disminuir los errores con la realización de un trabajo colaborativo, aumentando la productividad y la satisfacción de los clientes por la entrega de un servicio de mayor calidad con un alto valor agregado intrínseco.

Caso 2. Calidad de servicios turísticos de naturaleza.

Objetivo: elevar la calidad del servicio turístico.

Efecto: estancamiento del destino turístico de naturaleza.

Variable respuesta: porcentaje de satisfacción de los servicios turísticos (%).

Causas: se identifican cinco causas y 30 subcausas. Las causas son:

1. Suministros y abastecimientos.
2. Infraestructura de servicio.
3. Desfase entre expectativas de clientes y diseño de productos turísticos.
4. Capacitación.
5. Motivación.

Se identifican factores de interés relacionados con las causas 1), 4) y 5).

Factores: Todos medidos a dos niveles:

A: Abastecimiento (bajo, alto)

B: Capacitación (bajo, alto)

C: Motivación (bajo, alto)

Réplicas: 2^3 con 3 réplicas (24 pruebas).

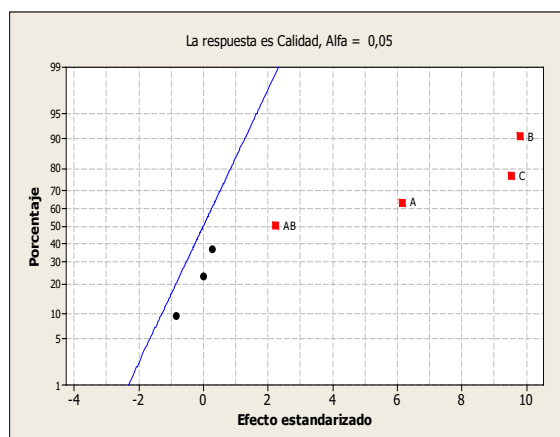
Modelo matemático (3 factores):

$$Y_{ijk} = \mu + A_i + B_j + C_k + (AB)_{ij} + (AC)_{ik} + (BC)_{jk} + (ABC)_{ijk} + e_{ijk}$$

Análisis de los datos e interpretación de los resultados

Se cumple el requisito de la normalidad (P valor 0,267) y la varianza constante (P Valor de 0.252 en la Prueba de Bartlett) para los residuos. En la figura 7 se representan con letras los efectos principales e interacciones significativas.

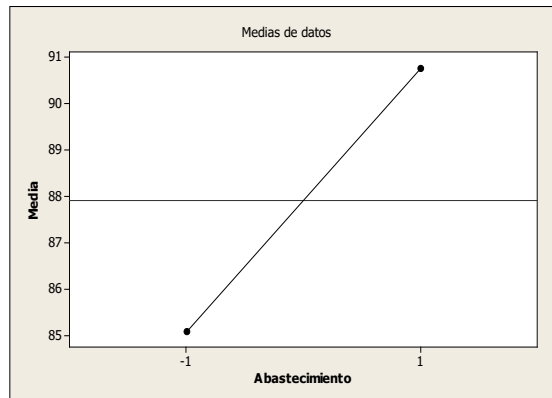
Figura 7. Gráfica normal de efectos estandarizados.



Fuente: Elaboración propia.

La mejor opción de C (Abastecimiento) es en el nivel alto para garantizar mayor calidad del servicio turístico, tal como se muestra en la figura 8. La calidad del servicio llega a alcanzar una satisfacción del 91% en ese nivel alto.

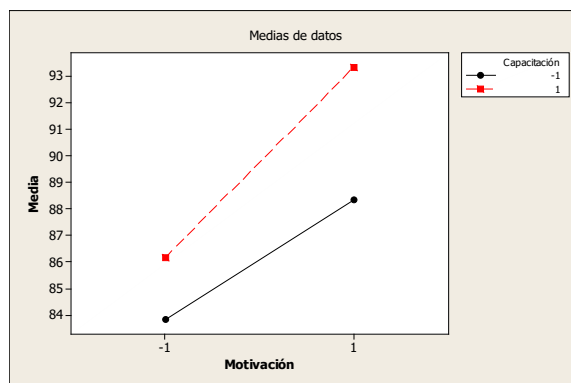
Figura 8. Efectos principales de abastecimiento en la calidad del servicio turístico.



Fuente: Elaboración propia.

La figura 9 muestra la influencia de la interacción AB en la calidad, por lo que se recomienda como mejor opción la capacitación y la motivación en el nivel alto (Acosta, 2014), lo cual era lógico de esperar.

Figura 9. Influencia de la Capacitación y Motivación en la calidad del servicio turístico.



Fuente: Elaboración propia.

Caso 2. Costo por tiempo de estadía de la carga de mercancía.

Objetivo: disminuir el costo por tiempo de estadía en la descarga de mercancía.

Efecto: eficiencia en la descarga de mercancía.

Variable respuesta que mide el efecto: cobro por tiempo de estadía de la carga (UM). La UM significa unidades monetarias.

Causas: se identifican 6 causas, 46 subcausas y 37 subsubcausas. Las causas que provocan los elevados costos son:

1. Planificación de los transportes de carga.
2. Disponibilidad técnica.
3. Abastecimiento técnico material.
4. Gestión de cobros y pagos.
5. Comunicación institucional.
6. Inestabilidad de los trabajadores en los talleres.

Los factores de interés están relacionados con las causas 1) y 4).

Factores:

A: Clientes (A y B).

B: Meses (12 meses del año).

Réplicas: 24 pruebas seleccionadas aleatoriamente de los años 2014 y 2015.

Modelo matemático (2 factores):

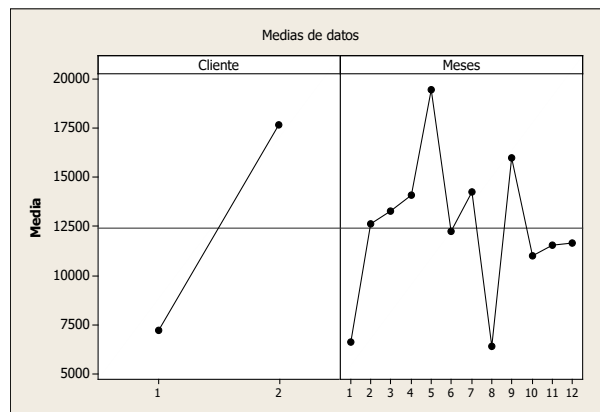
$$Y_{ij} = \mu + A_i + B_j + (AB)_{ij} + e_{ij}$$

Análisis de los datos e interpretación de los resultados:

El Valor P del ANOVA para los factores Cliente es 0,000, para Meses es 0,009 y para la interacción Cliente*Meses es 0,422, lo que permite concluir que los factores Cliente y los Meses son significativos y no así la interacción. En la figura 6 se aprecia para el cobro por tiempo de estadía de la carga que el cliente 2 es al que más se le ha cobrado por concepto de estadía de la carga, siendo los meses más altos el de mayo (5) y septiembre (9), lo que se ratifica en la figura 7 del Diagrama de caja de todas las interacciones.

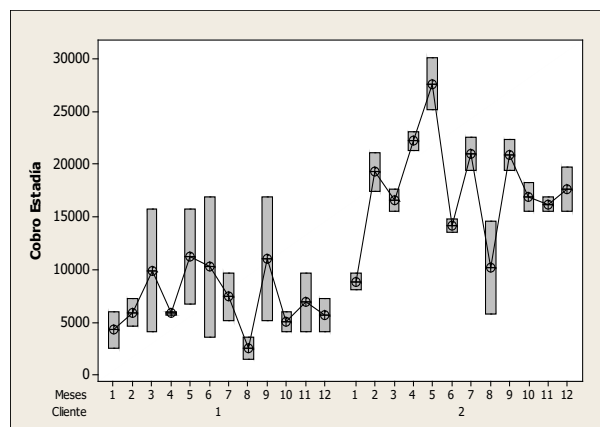
Se cumple el requisito de normalidad de los residuos al obtenerse un valor P de 0,267, por lo que se Acepta la hipótesis H_0 de que los residuos sigan una distribución normal. También se cumple el requisito de la varianza constante de los residuos con el valor de P de 0,62.

Figura 10. Efectos principales para el cobro por cliente y tiempo de estadía.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 11. Diagrama de caja de cobro por estadía.



Fuente: Elaboración propia.

Las diferencias significativas de los dos factores ratificaron mejorar la planificación de la transportación de carga a través de un nuevo procedimiento, lo que se convirtió en un proyecto de innovación (Méndez, 2016).

5. Conclusiones.

Infinidades son las aplicaciones que se pueden tener del diseño de experimentos en las empresas, entre las que se pueden mencionar la evaluación de diversos métodos de trabajo y tecnologías, la introducción y mejora de productos, la evaluación de materias primas, la valoración de factores cualitativos como las habilidades, la capacitación y la motivación, entre otras. A pesar de ello se considera que aún no se han explotado las potencialidades de esta metodología estadística en el ámbito empresarial.

Una alternativa para el uso y generalización del diseño de experimentos en el contexto empresarial se refiere al empleo de los datos históricos para explorar el comportamiento de dichos procesos y su influencia en variables respuestas relacionadas con los factores a estudiar u objetivos establecidos, sin tener que planear a priori el experimento. Este estudio puede complementarse con otros diseños que se prevean y se disponga de los recursos y el tiempo requerido para su ejecución.

El registro sistemático de los datos que se generan en la cadena de valor de procesos productivos de bienes y servicios es una premisa para el uso efectivo del diseño de experimentos, facilitando la generación de conocimiento, al descubrir las causas de los problemas y las fuentes de variación que más influyen en los indicadores de respuestas y las metas establecidas por la dirección de la organización.

La aplicación de software estadísticos para el procesamiento de resultados, el entrenamiento en dichos paquetes informáticos y en el diseño de experimentos, de conjunto con la aplicación del enfoque a procesos, pueden formar parte de las competencias que se requieren en la actualidad para incrementar la eficiencia y eficacia en el sistema empresarial.

La difusión de la guía del diseño de experimentos para los directivos empresariales se lleva a cabo en la Especialidad de Dirección y Gestión Empresarial que se imparte en Cuba y los tres casos expuestos corresponden a experiencias prácticas resultantes de esta capacitación.

La experiencia en las diversas aplicaciones que se han desarrollado en procesos y productos con el análisis de varianza y el 2^k a partir de datos históricos y experimentos realizados según las variables de interés, así como las condiciones asociadas a causas o factores a investigar evidencian la capacidad del método del diseño de experimentos para generar posibles alternativas de cambio e innovación empresarial, ya sean de procesos, productos, comercial y organizacional.

Referencias

- Acosta, J.L. (2014). *Estrategia de producto turístico para el proyecto minero de Pinar del Rio con enfoque al desarrollo local*, 60. La Habana, Cuba: Taller integrador Ciclo de I+D+i avanzada. Especialidad de Dirección y Gestión Empresarial. Escuela Superior de Cuadros del Estado y del Gobierno.
- Angrist, J.D., & Pischke, J.S. (2010). The Credibility Revolution in Empirical Economics: How Better Research Design is taking the Con out of Econometrics, *Journal of Economic Perspectives*, 24(2), 3-30. DOI: 10.1257/jep.24.2.3.
- Antony, J. (2014). *Design of Experiments for Engineers and Scientists*. (2ed.). Edinburgh, UK: Elsevier.

- Bareite, C.R. (2002). Design research for sustained innovation. *Cognitive Studies* 9(3), 321-327.
- Barrentine, L.B. (1999). *An Introduction to Design of Experiments: A Simplified Approach*. Milwaukee, USA: ASQ Quality Press.
- Bergue, R.D. (2018). Programa para la implantación ordenada y progresiva de la metodología BIM en IPROYAZ. La Habana, Cuba: Tesis de Especialidad de Dirección y Gestión Empresarial. Escuela Superior de Cuadros del Estado y del Gobierno.
- Box, G., Hunter, J.S., & Hunter, W.G. (2005). *Statistics for Experimenters. Design, Innovation, and Discovery (2ed.)*. New Jersey. USA: Wiley Series in Probability and Statistics. Wiley-Interscience.
- Campbell, D.T., & Stanley, J.C. (1963). *Experimental and Quasi-Experimental Designs for Research*. Boston: Houghton Mifflin.
- Cantamessa, M., Montagna, F., & Cascini, G. (2016). Design for innovation - A methodology to engineer the innovation diffusion into the development process. *Computers in Industry*, 75, 46-57. DOI: 10.1016/j.compind. 2015.10.013.
- Cobb, P., Confrey, J., Disessa, A., Lehrer R., & Schauble, L. (2003). *Design Experiments in Educational Research*. American Educational Research Association. DOI: 10.3102/0013189X032001009.
- Cox, D.R., & Reid, N. (2000). *The Theory of the Design of Experiments*. Florida, USA: CRC Press.
- Daniel, C. (1976). *Applications of statistics to industrial experimentation*. Toronto, Canada: John Wiley & Sons.
- Delgado, M. (1998). La calidad y la innovación tecnológica en la biotecnología aplicada a la salud. *Dirección y organización: Revista de dirección, organización y administración de empresas*, 19, 125-132.
- Delgado, M., Esmeraldo, M.E., & Oliveira, H. (2002). Análisis comparativo de instrumentos de evaluación de la innovación tecnológica. *Ingeniería Industrial*, 23(3), 56-63.
- Delgado, M., Pino J.L., Solís, F., & Barea, R. (2008). Evaluación integrada de la innovación, la tecnología y las competencias en la empresa. *Revista madri+d*, 47. Recuperado de: <https://www.madrimasd.org/revista/revista47/tribuna/tribuna1.asp>
- Delgado, M. (2016). Innovación en la administración pública. En: *Contribuciones al conocimiento de la administración pública*, 67-110. Editorial Universitaria Félix Varela.
- Delgado, M. (2017). Innovación Empresarial. En: Delgado, M. (Coordinador académico). *Temas de Gestión Empresarial*, 2, 117. La Habana: Editorial Universitaria Félix Varela.
- Delgado, M. (2018). Proyectos de innovación en Administración Pública y Empresarial en Cuba, *Folleto Gerenciales*, 22(2), 71-84.

- Deming, S.N., & Morgan, S.L. (1993). *Experimental design: a chemometric approach in Data handling in science and technology*, 11, 437. Amsterdam, Netherlands: Elsevier Science Publishers B.V.
- Eardley, A., & Uden, L. (2011). *Innovative Knowledge Management: Concepts for Organizational Creativity and Collaborative Design*, 423. New York, USA: Information Science Reference.
- Edquist, C. (2016). *The Swedish National Innovation Council: Innovation policy governance to replace linearity with holism*, 2016/24, 1-52. Lund University, Sweden: Papers in Innovation Studies. Centre for Innovation, Research and Competence in the Learning Economy (CIRCLE).
- Farooq, M.A., Nóvoa, H., Araújo, A., & Tavares, S. (2015). An innovative approach for planning and execution of pre-experimental runs for Design of Experiments. *European Research on Management and Business Economics*, 22(3), 155-161. DOI: 10.1016/j.iedee.2014.12.003.
- Gutiérrez, H., & de la Vara, R. (2008). *Análisis y diseño de experimentos (2ed.)*. México: McGraw-Hill Interamericana.
- Hoaglin, D.C., Mosteller, F., & Tukey, J. (1991). *Fundamentals of Exploratory Analysis of Variance*. USA: John Wiley & Sons.
- Ishikawa, K. (1986). *Qué es el Control Total de la Calidad. La modalidad japonesa*. Bogotá, Colombia: Editorial Norma.
- ISO 3534-3:2013. (2015). *Statistics - Vocabulary and symbols - Part 3: Design of experiments*. International Standardization Organization.
- Jensen, D.D., Fast, A.S., Taylor, B.J., & Maier, M.E. (24-27 august of 2008). *Automatic Identification of Quasi-Experimental Designs for Discovering Causal Knowledge*. Proceedings of the 14th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining, Las Vegas, Nevada, USA. Recuperado de: <http://andrewfast.com/publications/jensen-et-al-kdd2008.pdf>
- Klauss, H. & Kempthorne, O. (2008). *Design and Analysis of Experiments. Introduction to Experimental Design (2ed.)*. New Jersey, USA: Wiley-Interscience.
- Liedtka, J. (2015). Design Thinking with Innovation Outcomes through Cognitive Bias Reduction. *Journal of Product Innovation Management*, 32(6), 925-938. DOI: 10.1111/jpim.12163.
- Mason, R.L., Gunst, R.F., & Hess, J.L. (2003). *Statistical Design and Analysis of Experiments. With Applications to Engineering and Science (2ed.)*. New Jersey, USA: Wiley-Interscience.
- Méndez, L. (2016). *Proyecto de innovación en la empresa provincial del transporte de Cienfuego*. La Habana, Cuba: Taller integrador Ciclo de I+D+i avanzada. Especialidad de Dirección y Gestión Empresarial. Escuela Superior de Cuadros del Estado y del Gobierno.
- Montgomery, D.C. (2013). *Design and analysis of experiment (8ed.)*. USA: Wiley, John Wiley & Sons.

- NC ISO 9001:2015 (septiembre, 2015) *Sistemas de Gestión de la Calidad. Requisitos (5ed.)*. La Habana, Cuba: Edición. Oficina Nacional de Normalización (NC). ICS: 03.120.10.
- NC ISO 9000:2015 (octubre, 2015). *Sistemas de Gestión de la Calidad. Fundamentos y vocabulario (3ed.)*. La Habana, Cuba: Oficina Nacional de Normalización (NC). ICS: 03.120.10; 01.040.03.
- OCDE & Eurostat. (2006). *Manual de OSLO. Guía para la recogida e interpretación de datos sobre innovación (3ed.)*. Grupo Tragsa. Recuperado de: <http://www.itq.edu.mx/convocatorias/manualdeoslo.pdf>.
- Olugbenga, A.R. (2016). Six Thinking Hats and Social Workers' Innovative Competence: An Experimental Study. *Journal of Education and Practice*, 7(24), 149-153.
- Peña, D. (1992). *Estadística. Modelos y métodos 2. Modelos lineales y series temporales (2ed.)*. Madrid, España: Editorial Alianza Universidad Textos.
- Salazar, J.C., & Baena, A. (2009). Análisis y diseño de experimentos aplicados a estudios de simulación. *DYNA*, 76(159), 249-257.
- Schwartz, D.L., & Lee, J.C. (2005). *Instrumentation and innovation in design experiments: taking the turn towards efficiency*, 1-40. Recuperado de: <https://pdfs.semanticscholar.org/f20d/940f10c2de6b99170eab30fbe5db4034e369.pdf>
- Schunn, C.D., Paulus, P.B., Cagan, J., & Wood, K. (august, 2006). *Final Report from the NSF Innovation and Discovery Workshop: The Scientific Basis of individual and Team Innovation and Discovery*, 1-18. Edited by NSF Award BCS0623421.
- Toutenburg, H., & Toutenburg S. (2009). *Statistical Analysis of Designed Experiments*. New York, USA: Springer. DOI 10.1007/978-1-4419-1148-3.
- Tschimmel, K. (2012). *Design Thinking as an effective Toolkit for Innovation*. Barcelona, España: In: *Proceedings of the XXIII ISPIM Conference: Action for Innovation: Innovating from Experience*.
- Wang, F., & M.J. Hannafin (2005). Design-Based Research and Technology-Enhanced Learning Environments. *Educational Technology Research and Development*, 53(4), 5-23.
- Weber, B., Mutschler, B., & Reichert, M. (2010). Investigating the effort of using business process management technology: results from a controlled experiment. *Science of Computer Programming*, 75(5), 292-310. DOI: 10.1016/j.scico.2009.12.003