

DISEÑOS EXPERIMENTALES COMO HERRAMIENTA DE MEJORA DE PROCESOS

EXPERIMENTAL DESIGNS AS A PROCESS IMPROVEMENT TOOL

Oscar Iván Yáñez Hernández

Tecnológico Nacional de México / IT de Celaya, México
D2103003@itcelaya.edu.mx

Armando Ríos Lira

Tecnológico Nacional de México / IT de Celaya, México
armando.rios@itcelaya.edu.mx

Yaquelin Verenice Pantoja Pacheco

Tecnológico Nacional de México / IT de Celaya, México
yaquelin.pantoja@itcelaya.edu.mx

Recepción: 18/octubre/2023

Aceptación: 27/noviembre/2023

Resumen

El escenario de globalización actual en el mercado obliga a las empresas a buscar formas de mantenerse competitivas, los diseños experimentales es una de las metodologías que más pueden aportar en la mejora de productos y procesos. La presente investigación muestra la aplicación de diseño de experimentos (comúnmente conocido como DOE por sus siglas en idioma inglés) en la industria como metodología de optimización. El objetivo del documento es determinar la pertinencia de aplicación de acuerdo con las características que poseen cada una de estas metodologías, se busca también identificar las principales dificultades de aplicación de estas.

El estudio está dividido en cinco secciones. Introducción, métodos, resultados, conclusiones y discusión. Se pudo determinar en que situaciones es mas conveniente utilizar cada una de las diferentes metodologías revisadas en el documento.

Palabras Clave: Diseño de experimentos, optimización, metodología, revisión, comparación.

Abstract

The current globalization scenario in the market forces companies to look for ways to remain competitive; experimental designs are one of the methodologies that can contribute the most to the improvement of products and processes. This research shows the application of design of experiments (commonly known as DOE) in industry as an optimization methodology. The objective of the document is to determine the relevance of application according to the characteristics that each of these methodologies possess, it also seeks to identify the main difficulties in their application. The study is divided into five sections. Introduction, methods, results, conclusions, and discussion. It was possible to determine in which situations it is most convenient to use each of the different methodologies reviewed in the document.

Keywords: *Experiment design, optimization, methodology, review, comparison.*

1. Introducción

Hoy en día se vive en un entorno más dinámico y cambiante. Las nuevas tecnologías, el incremento en la oferta hacen que los productos posean mejores características de calidad.

La integración económica de los países hace posible ofertar los productos en cualquier parte del mundo, y esto incrementa el uso que se le da a estos productos. Distintas configuraciones de producción y operación manufacturan los productos, pero hay algo que permanece constante los estándares de calidad deseados del producto.

Una de las claves para el éxito de las organizaciones es la velocidad con la que aprenden. Cuando se inicia con la etapa de aprendizaje en los procesos de fabricación, algo muy común es querer analizar grandes cantidades de datos históricos. Sin embargo, al analizar tales cantidades de datos históricos, pueden existir riesgos considerables que implican que la inversión de tiempo y dinero puesta en esta revisión puede arrojar resultados pobres o insatisfactorios. La inconsistencia de datos, la existencia de factores o variables altamente relacionadas; son algunos de estos riesgos [Prat et al., 2000].

La forma en que se recolectan los datos hace complicado poder observar fácilmente la influencia que está ejerciendo cada variable sobre el proceso. Utilizar datos históricos es como escuchar pasivamente al proceso, mientras que la experimentación significa establecer una conversación activa con el proceso [Hunter, 1975].

Es debido a esto que la experimentación, en la cual podemos realizar cambios bajo condiciones controladas y analizar lo que sucede con la variable de respuesta, se convierte en una herramienta imprescindible para conocer más a fondo nuestros procesos o productos, que desgraciadamente no ha sido tan explotada.

Cotidianamente realizamos experimentos, buscamos la vía más rápida para llegar a un destino, probamos distintos ingredientes para obtener algún alimento o simplemente buscamos formas diferentes de realizar nuestras actividades esperando obtener mejores resultados. Es aquí en donde los diseños de experimentos se convierten en una opción más estructurada para poder dar solución óptima a problemas que se presentan en la industria [Antony et al., 2003].

En la industria, la experimentación llega a aplicarse en áreas como el diseño de nuevos productos y la mejora de procesos ya existentes. La experimentación nos va a permitir conocer cómo se comportan estas variables dentro de una región de interés. El objetivo final buscado es generalmente la mejora de los procesos hasta obtener un nivel deseado [Ryan, 2007].

La optimización es una disciplina fundamental en campos de la ciencia tales como la informática, la inteligencia artificial o la investigación de operaciones. En otras comunidades científicas, la definición de optimización se torna bastante imprecisa, y se relaciona con la idea de “hacerlo mejor”. El concepto de optimización se concibe como el proceso de encontrar la mejor solución posible a un problema de optimización [Duarte et al., 2007].

La metodología estadística por excelencia para poder optimizar procesos de manera eficiente se conoce como DOE [Lye, 2005].

Sin embargo, en la mayoría de los problemas presentados en la industria contamos con restricciones principalmente el tiempo y los costos, lo que ya supone una limitante para iniciar la experimentación. Es por esto que las empresas siempre

buscaban conseguir la mayor cantidad de información de la manera más eficiente. En la revisión bibliográfica se clasifican las estrategias para su aplicación en las industrias como mejor acierto (BG), un factor a la vez (OFAT) y metodología estadística (DOE).

BG utiliza los conocimientos previos sobre un proceso, modifica las variables realiza pruebas bajo condiciones particulares esperando obtener mejores resultados. Esta estrategia no tiene sustento científico ya que está sustentada en la intuición, y en la experiencia.

OFAT modifica cada vez un factor tal cual su nombre lo indica, y así de esta manera se puede conocer el efecto que tiene cada variable sobre la respuesta [Montgomery, 2005]. Esta estrategia a pesar de utilizar el método científico y ser de las más utilizadas en la industria pocas veces es útil para encontrar las mejores condiciones del proceso. Además, al realizar la experimentación de un factor por cada corrida no es posible conocer el efecto sobre la respuesta de las interacciones de los factores. Es debido a que es más eficiente utilizar una metodología estadística y de esta forma poder tener una mejor planificación y lectura de los experimentos.

La metodología de superficie de respuesta se utiliza generalmente cuando los experimentos no tienen no tienen respuestas esperadas o el nivel de mejoras no es suficiente, es por eso que es necesario moverse de lugar en lo que refiere a la región experimental, esto se denomina “metodología de superficie de respuesta”. Esta herramienta es ideal para encontrar condiciones de operación de un proceso ya sea de una o varias características de calidad [Box & Drapen, 2007].

El modelo de Taguchi enfatiza la importancia de evaluar el desempeño bajo condiciones de campo como parte del proceso de diseño y el hecho que la variación funcional en el desempeño esta influenciada por los factores de ruido los cuales varían en el ambiente en el que los procesos o productos están funcionando.

La filosofía Taguchi está basada en un modelo aditivo de los efectos principales para la cual, la presencia de interacciones es algo indeseable y en caso de que en el proceso se encuentre una relación de este tipo esta es tomada como parte del error experimental [Fowlkes & Creveling, 1995]. Por consiguiente, la filosofía Taguchi está basada en un modelo expresado en los términos de la ecuación 1.

$$Y = .0 + .1X_1 + .2X_2 + .3X_3 + \dots + .KX_K \quad (1)$$

En la expresión anterior se puede observar la aditividad dejada de manifiesto en esta metodología y la no presencia de interacciones bajo la cual se ampara el método de diseño experimental propuesto por Taguchi.

Otra característica clave de esta metodología son los arreglos ortogonales, los cuales no son más que arreglos factoriales fraccionados en los que se basa como medio para la realización del experimento, así como la utilización de una medida de variabilidad denominada razón señal ruido (S/N) para la realización del análisis de resultados.

El método NOBA es un algoritmo capaz de generar diseños fraccionados factoriales de niveles mixtos ortogonales y balanceados [Pantoja et al., 2019].

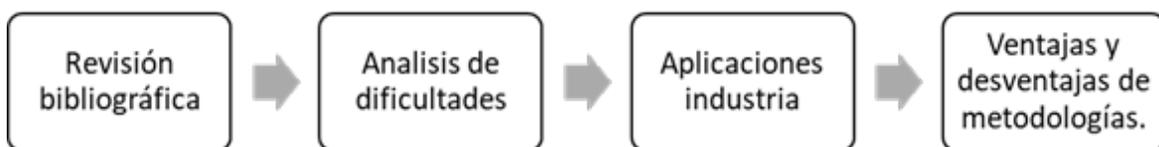
El método NOBA hace uso de reglas simples para crear diseños fraccionados de niveles mixtos de ortogonalidad próxima o cercana. Este método hace uso de un factor divisor y vectores permutados para crear una tabla de orden estándar que contiene segmentos y posiciones, estos segmentos y posiciones son usados para extraer las corridas del factorial completo para crear una fracción. La ventaja principal de este método es que no requiere programación compleja; para crear las fracciones, el experimentador solo necesita el número de factores, niveles, el método, la tabla de vectores permutados y una hoja de cálculo en Excel.

El diseño de Box-Behnken es un diseño cuadrático independiente en el sentido de que no contiene un diseño factorial fraccionado o fraccionado [Box & Behnken, 1960]. En este diseño, las combinaciones de tratamiento se encuentran en los puntos medios de los bordes del espacio de proceso y en el centro. Estos diseños son giratorios (o casi rotativos) y requieren 3 niveles de cada factor. Los diseños tienen una capacidad limitada para el bloqueo ortogonal en comparación con los diseños compuestos centrales. El documento es abordado a través de cinco secciones. La primera parte consta de una revisión para involucrar al lector en la terminología sobre diseños de experimentos en ingeniería. La segunda establece la metodología seguida. En la tercera sección se muestran las aplicaciones realizadas a nivel industrial utilizando las diferentes metodologías, las variables utilizadas, los resultados obtenidos, adicional a esto se detectaron las barreras o dificultades que

se presentan para la aplicación de DOE. La cuarta sección menciona las ventajas y desventajas de cada una de estas metodologías y su factibilidad como herramienta de mejora. En la última sección se aborda la discusión sobre lo encontrado en el estudio, en la cual se aportan también escenarios en los cuales es conveniente utilizar las distintas metodologías. El objetivo de la investigación es determinar y comparar la eficacia y la eficiencia de cada metodología DOE, así como la conveniencia de aplicación.

2. Métodos

La presente investigación es de corte exploratorio, la cual se efectúa normalmente cuando el objetivo a examinar en un tema o problema de investigación ha sido poco estudiado, del cual se tienen muchas dudas o no se ha abordado antes [Hernández, Fernández, & Baptista, 2003]. Las variables de estudio son las metodologías DOE un factor a la vez (OFAT), superficie de respuesta (MSR), diseños de Taguchi (TD), matrices balanceadas casi ortogonales (NOBA), Box-Behnken (BBD). Se realizó una búsqueda exhaustiva de la literatura sobre estudios que tuvieran como objetivo mejorar el desempeño de un proceso industrial en revistas científicas, a través del acercamiento al tema, búsqueda literaria relacionada con el problema a analizar, elección de la fuente de información. En la figura 1 se muestra el procedimiento que inicio con la revisión bibliográfica de las optimizaciones hasta ahora realizadas con las distintas metodologías DOE disponibles. Una vez identificadas estas metodologías, se detectaron las dificultades que se presentaron para la aplicación de DOE. Posteriormente se analizaron las principales ventajas y desventajas de cada DOE y su factibilidad como estrategia de optimización.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 1 Metodología.

3. Resultados

Durante muchos años se utilizó la estrategia OFAT conocida como el método científico y atribuida a Francis Bacon en el siglo XVII, aunque basada en los griegos (1600 AC). Dicha metodología tuvo su apogeo con Thomas Edison, que aplicó la estrategia OFAT para inventar la bombilla de luz [Anderson, 2005].

Estas estrategias quedaron obsoletas, cuando Ronald Fisher en 1920 descubrió un método mucho más eficiente para experimentar basado en los diseños factoriales. No se encuentran en la bibliografía reciente aplicaciones a nivel industrial de OFAT, debido a la aparición de metodologías más eficientes. Sin embargo, en una investigación llevada a cabo para encontrar las condiciones óptimas de cultivo del hongo *Trichoderma* utilizando el diseño Box-Behnken los autores utilizaron un cribado para seleccionar los tipos de sustratos a utilizar en el diseño, utilizando la estrategia OFAT colocando los once sustratos disponibles en la región en matraces y determinar cuál era el que mayor cantidad de esporas arrojaba para continuar con este en un experimento posterior [Mulatu et. al, 2021].

La metodología de superficie de respuesta (MSR) fue utilizada para la optimización de la degradación fotocatalítica del colorante naranja de metilo (NM) empleando como catalizador dióxido de titanio sulfatado preparado por el método sol-gel. Las variables estudiadas fueron pH (3-11), carga de catalizador (0.1-1 g/L), concentración del colorante NM (10 - 30 ppm), en el cual las tres variables afectaron significativamente de forma lineal el porcentaje de degradación del NM. Además, se presentó un efecto cuadrático en el pH y la concentración del colorante, aunque no se obtuvieron efectos significativos en la interacción de las variables. Los valores en los que se presenta el máximo para la degradación de NM se obtuvieron por la superposición de las gráficas de contornos, en las que el incremento de la concentración del catalizador mostró un efecto directamente proporcional a la degradación [Del Angel et al., 2015].

Muñoz et al. [2009] emplearon un diseño factorial 2^3 ampliado a central compuesto para investigar los efectos de las variables relación $[\text{CO}_3^{2-}/\text{HCO}_3^-]$, presión inicial del gas y temperatura del sistema gas-líquido, en el proceso de absorción de CO_2 en una solución alcalina de carbonato-bicarbonato de sodio, utilizando un biogás

simulado como mezcla gaseosa problema. Encontraron una significativa influencia de la relación de concentración en el proceso de remoción del dióxido de carbono, obteniéndose un modelo de superficie de respuesta de segundo orden validado estadísticamente mediante análisis de varianza, el cual explica cerca del 98.41% de la variabilidad del cambio del porcentaje (v/v) de CO₂ en el biogás simulado. Se logró una máxima remoción de CO₂ del 62.86% para un tiempo de contacto de sesenta minutos.

Fernández et al. [2020] utilizaron la metodología de superficie de respuesta para modelar los cambios de productividad de *C. nlemfuensis*, sometido a diferentes dosis de fertilización y edades de rebrote en condiciones de corte, en ambos períodos. Utilizaron un diseño de parcelas divididas con tres réplicas. La parcela principal fue la dosis de aplicación de nitrógeno (0, 200 y 400 kg de N/ha/año) como nitrato de amonio. Mientras, en las subparcelas se ubicaron las 12 edades de rebrote (desde 1 hasta 12 semanas). Se conformaron un total de 36 tratamientos, correspondientes a las combinaciones antes descritas (dosis de nitrógeno x edad de rebrote). La aplicación de esta metodología permitió la determinación de los extremos, que en cada indicador fueron variables en todas las expresiones para *C. nlemfuensis*, y se alcanzaron fuera de los intervalos estudiados. No obstante, permitieron obtener valores óptimos en la región de estudio y valorar otras alternativas para valores pronosticados según lo obtenido.

El polinomio de segundo grado mostró el mejor ajuste para las variables relacionadas con el rendimiento y un elevado coeficiente de determinación.

Villar et. al. [2014] hicieron uso de la metodología de superficie de respuesta en el estudio de protocolo de mezcla para la obtención de emulsiones estables de aceite en agua (O/W). El método experimental se basó en el diseño factorial 2³ con punto central, variando la relación másica aceite: agua, la velocidad de agitación, el tiempo de mezclado y la posición del agitador. Mediante análisis de regresión se halló una correlación logarítmica para predecir el diámetro promedio superficial (d_{32}) de las gotas de la emulsión en función de proporción másica aceite: agua, tiempo y velocidad de agitación; esta última variable ejerció la mayor influencia. La correlación satisfizo los criterios fundamentales de independencia,

homocedasticidad y distribución normal de los parámetros. La metodología de diseño puede ser empleada a nivel industrial para reducir la cantidad de ensayos a realizar y determinar la influencia estadística de las variables del proceso de mezclado sobre el diámetro promedio de las gotas de una emulsión.

Zapata & Sarache [2014] aplicaron diseños de Taguchi en una empresa productora de café soluble. El método facilitó la experimentación con factores no controlables, la depuración de las variables del proceso de producción de café soluble que afectaban sus resultados y la evaluación cuantitativa de la pérdida de calidad debido a variaciones funcionales. Para este caso de estudio, en un trabajo conjunto de la empresa y los investigadores se definieron las variables: tipo de secado del café en grano, tiempo de la extracción de sólidos solubles, temperatura de la extracción de sólidos solubles, tiempo de concentración, tiempo de secado del extracto de café concentrado, tamaño del grano y relación de aroma/buqué. La experimentación se llevó a cabo en un diseño L_4 , tomando como variable de respuesta la relación aroma/buqué involucrado en la experimentación; por su parte, el tipo de secado del café en grano se asumió como variable ruido, según lo encontrado en una anterior fase de experimentación. De la primera fase experimental se dedujo que las tres variables ruido que tenían gran influencia en la extracción fueron el tipo de secado, la temperatura de la extracción y el tamaño del grano de café. De este primer análisis se concluyó que la variable ruido más significativa era el tipo de secado al momento de ser alimentado el tándem de extracción. La experimentación les permitió determinar que el factor que se debía controlar para optimizar la taza de café corresponde al volumen de filtración de compuestos incoloros contenidos en el agua potable; asimismo, los resultados permitieron concluir que el efecto de la extracción en la variabilidad de la respuesta es en la práctica nulo y que el efecto de las variables temperatura, concentración y aroma no son significativos según se demuestra con el análisis de varianza.

La metodología Taguchi del diseño experimental fue aplicada en una planta de producción de un ingenio azucarero del Valle del Cauca [Medina et al., 2007].

Se realizó una primera fase experimental, en la cual se analizaron tres variables ruido que se sospechaban tenían gran influencia en la extracción del molino 1, estas

variables fueron: variedad de caña, tipo de corte y materia extraña. De este primer análisis se concluyó que la variable ruido más significativa era el tipo de corte de la caña al momento de ser alimentado el tándem de molienda. Se seleccionó un arreglo ortogonal L9 para la matriz interna, permitiendo estudiar máximo cuatro factores a tres niveles cada uno, utilizando la técnica del falso nivel para permitir involucrar un factor a dos niveles en una columna desarrollada para estudiar factores a tres niveles y un arreglo compuesto de solo dos corridas para la matriz externa [Fowkles & Creveling, 1995]. Se pudo observar que los factores que mayor efecto tienen sobre la robustez del sistema son las velocidades de las picadoras I y II, así como la presión hidráulica aplicada a los cabezotes del primer molino.

Báez et al. [2010] para el Incremento de la Resistencia a la Prueba de Jalón de un Diodo Emisor de Luz en una compañía electrónica del noroeste de México, el cual es utilizado en el ensamble de teléfonos celulares, aplicaron un arreglo de Taguchi. Al término del estudio lograron una mejora significativa al aumentar la capacidad del proceso de 0.56 a 1.45 y un impacto en la reducción de los costos, tan solo por eliminación de desperdicio, del orden de 130 mil dólares estadounidenses anuales. Los factores se dividieron en factores de control y de ruido. Los factores estudiados de control fueron cantidad de epóxico, presión de aplicación, ajuste de altura, ventiladores y temperatura como factor de ruido. Para albergar estos factores fue necesaria la utilización de dos Arreglos Ortogonales (AO), un L₈ para el arreglo interno y un L₄ para el arreglo externo. La línea de producción donde se desarrolló el proyecto trabaja 18 horas al día, durante cinco días a la semana, dando como resultado una producción de 1170,000 unidades mensuales, información con la cual se proyecta una producción aproximada de 14040,000 unidades anuales después de la optimización realizada.

Mendez & Olaya [2015] realizaron una aproximación del método Taguchi para el estudio de recubrimientos de óxido de cromo aplicados por proyección térmica a la llama. Utilizaron un diseño experimental de Taguchi de arreglo ortogonal L9 con tres réplicas R1, R2 y R3, que definió la combinación de parámetros a utilizar para aplicar recubrimientos de óxido de cromo y evaluar cual combinación de parámetros es mejor en la obtención de bajos coeficientes de fricción y bajas corrientes de

corrosión, con el fin de utilizar estos parámetros en la aplicación de recubrimientos que sean útiles para la recuperación de piezas de la industria naval. Los parámetros seleccionados para este estudio corresponden a las presiones de los gases precursores: oxígeno, acetileno y aire, cada uno con tres niveles (bajo, medio y alto). Los parámetros de respuesta están en el coeficiente de fricción (CDF) y la corriente de corrosión (ICORR). Estos parámetros fueron analizados a través de un análisis de varianza (ANOVA), de los datos obtenidos y de la relación S/R (Señal / Ruido). Dentro de los experimentos se lograron mínimos de los parámetros de respuesta como: CDF=0,03613 en el experimento E3 e ICORR=4,10E-6 A para el experimento E7. La obtención de combinaciones optimizadas se fundamentó en el análisis de la relación S/R recomendado por el método Taguchi, del cual se establecieron las siguientes combinaciones de parámetros: presión de oxígeno en 3,65 Bar, presión del acetileno en 0,83 Bar y presión de aire en 7 psi, para obtener bajos CDF y oxígeno en 3,65 Bar, presión del acetileno en 0,55 Bar y presión de aire en 15 psi, para obtener bajas ICORR. Se determinó también que el parámetro que tiene mayor influencia en los parámetros de respuesta es el acetileno.

El método NOBA al ser una metodología de reciente creación se encuentra solamente una aplicación práctica en la bibliografía. Esta metodología fue aplicada para la optimización de la producción de esporas del Hongo *Trichoderma* en una empresa de Biotecnología [Yáñez et al., 2023]. El diseño inicial el cual era de niveles múltiples contempló los factores aire (sí, no), humedad (30, 50 y 70%), pH (4, 5, 6 y 7), temperatura (23, 25 y 27°C) y sustrato (olote de maíz, grano de arroz, cascara de ajonjolí, semilla del árbol del pan) es decir un $2^1 3^2 4^2$, un factor con dos niveles, dos factores con tres niveles y dos factores con cuatro niveles, resultando un total de 288 corridas. Los factores significativos fueron aire, sustrato y la interacción aire-sustrato. Al aplicar la metodología solo se requirió de 48 corridas experimentales para poder obtener un 100% de incremento en la producción de esporas del hongo. En un estudio para determinar las condiciones óptimas de extracción de antioxidantes de *Decatropis bicolor* se utilizó un diseño de experimentos de Box-Behnken [Contreras et al., 2023]. Las variables analizadas fueron: tiempo (5, 15 y 25 minutos), temperatura (20, 55 y 90°C) y concentración de la muestra (2, 6 y 10%).

La actividad antioxidante se midió mediante las técnicas DPPH y FRAP, mientras que el contenido de fenoles totales se cuantificó mediante el método de Folin-Ciocalteu. Los extractos acuosos presentaron valores de 295 a 1511 mg ET/100 g vía radical DPPH. En cuanto a la actividad antioxidante vía reacciones redox, se encontraron valores de 138 a 691 mg EF₂₊/100 g. En todos los extractos acuosos de *D. bicolor* se observó la presencia de compuestos fenólicos en concentraciones variables, desde 739 a 2232 mg EAG/100 g. La temperatura fue factor determinante en la extracción, independientemente del tiempo y la cantidad de *Aranthó* utilizada. Reyes & Perez [2022] evaluaron la capacidad de adsorción de la fibra de fique en la remoción de Hg²⁺ en muestras de agua, mediante un DOE Plackett-Burman y Box-Behnken optimizando los factores que tienen más efecto significativo. Posteriormente determinaron los modelos matemáticos que explican la isoterma de adsorción y el modelo cinético que sigue el Hg²⁺ al interaccionar con el fique. Los resultados obtenidos mostraron que la fibra de fique presenta una buena capacidad de adsorción de Hg²⁺, el cual se ajustó al modelo de Freundlich que explica un proceso de biosorción multicapa en superficies heterogéneas, con una capacidad máxima de adsorción 8.60 mg/g. Así mismo, el modelo cinético que mejor se ajustó fue el de Elovich, lo que indica que hay quimisorción de este metal en la fibra de fique.

Erazo & Daniela [2020] llevaron a cabo un estudio con información acerca de las condiciones de cultivo de *Bacillus licheniformis* ATCC 14580 para la obtención de α -amilasas, mediante la aplicación de diseños experimentales. El proceso de optimización se llevó a cabo en dos etapas la primera fue el cultivo inicial de *Bacillus licheniformis* ATCC 14580. En esta etapa, se logró confirmar la morfología de este microorganismo ya que se visualizó colonias redondas de color crema, en las cuales se encuentran células con forma de bastón de color morado. La segunda etapa consistió en la aplicación de los diseños experimentales, Box-Behnken y Plackett-Burman, para optimizar de las variables que afectan a la producción de la α -amilasas. El análisis estadístico del diseño Box-Behnken permitió preseleccionar la fuente de carbono complementaria y fuente de nitrógeno que estimulen la formación de α -amilasas, biomasa y proteínas totales. Posteriormente, se determinaron las

variables significativas del proceso las cuales fueron el almidón, la lactosa y el pH; además con este diseño se determinó que las concentraciones óptimas de las variables cloruro de sodio (1.5 g/L), sulfato de magnesio (0.5 g sobre L), cloruro de calcio (0.1 g sobre L) y extracto de levadura (5 g sobre L).

Jaramillo et al. [2013] determinaron las mejores condiciones para la remoción del colorante Azul Ácido 9 (AA9) a través de un diseño factorial completo 2^3 y su posterior optimización mediante un diseño de superficie Box-Behnken utilizando tallos de flores (TF) como material adsorbente. Las variables evaluadas fueron dosis de adsorbente (D), concentración de colorante (C) y tiempo de contacto (t). El contenido del colorante se cuantificó por espectrometría UV-Vis. El modelo estadístico presentó un adecuado coeficiente de ajuste ($R^2 = 99,18\%$), permitiendo alcanzar una remoción del 98,5 % con una dosificación de $7,8\text{ gL}^{-1}$, concentración de colorante de $11,7\text{ mgL}^{-1}$ y tiempo de contacto de 104 min. Estos resultados sugieren que los residuos de flores constituyen un material adsorbente alternativo y potencial para el tratamiento de colorantes ácidos disueltos.

La tabla 1 muestra las aplicaciones realizadas con cada una de las metodologías, así como las ventajas y desventajas de cada una de estas. La elección de la metodología a utilizar dependerá del planteamiento inicial de mejora, si tengo un diseño de niveles mixtos, y no existen los suficientes recursos para correrlo completo lo ideal es fraccionarlo mediante el método NOBA, si es de niveles mixtos, pero no me interesan las interacciones y estoy enfocado en los efectos principales habría que utilizar un diseño de Taguchi. Si se está buscando un óptimo en la región experimental en los puntos centrales sin tomar en cuenta los valores extremos tendría que decidir por un Box-Behnken, si mi región experimental no es suficiente podría tomar en cuenta la región de operación y buscar ese óptimo dentro de esta mediante la metodología de superficie de respuesta. Si el diseño es simple y la variable de respuesta se vea afectada por un solo factor es factible utilizar OFAT.

4. Discusión

No existe una metodología mejor que otra, es simplemente saber seleccionar de acuerdo con el caso de estudio cual se adecua mejor. Podemos observar que de

acuerdo con sus características y al enfoque de estudio todas nos brindan la certeza de poder optimizar la variable de respuesta a estudiar.

Tabla 1 Ventajas y desventajas de las metodologías DOE.

Metodología	Ventajas	Desventajas	Aplicaciones
OFAT	<ul style="list-style-type: none"> Rápido conocimiento del efecto individual del factor. Cualquier característica de un producto puede ser entendida. Fácil aplicación. 	<ul style="list-style-type: none"> No están consideradas las interacciones entre factores. Demasiadas corridas experimentales. Obtención de subóptimos. 	<ul style="list-style-type: none"> Bombilla Edison Detección de óptimas materias primas. Producción de Trichoderma.
Superficie de respuesta	<ul style="list-style-type: none"> Permite resolver el problema de encontrar las condiciones de operación óptimas de un proceso. Ofrece por resultados valores óptimos de una o varias características de calidad de un producto. 	<ul style="list-style-type: none"> Tiene un nivel de complejidad elevado al de un diseño experimental simple. No se tiene una región específica de aceptación de las respuestas, así que la métrica de distancia está dirigida a las características del producto que tienen un valor objetivo específico, y por lo tanto su adecuación a las características que se minimizan. 	<ul style="list-style-type: none"> La optimización de la degradación fotocatalítica del colorante naranja de metilo. Investigar los efectos de las variables relación $[CO_3=HCO_3^-]$, presión inicial del gas y temperatura del sistema gas-líquido, en el proceso de absorción de CO_2 en una solución alcalina de carbonato-bicarbonato de sodio, utilizando un biogás simulado como mezcla gaseosa problema. Cambios de productividad de <i>C. nlemfuensis</i>. Obtención de emulsiones concentradas O/W.
Diseños de Taguchi	<ul style="list-style-type: none"> Permite el estudio de muchos parámetros. Identificación de parámetros clave. Se concentra en el concepto de diseño de parámetros que sirvan para disminuir la variabilidad en el desempeño de los productos. 	<ul style="list-style-type: none"> Resultados relativos Pocas matrices Enfoque secundario en las interacciones. 	<ul style="list-style-type: none"> Café soluble. Ingenio azucarero. Diodo emisor de luz. Estudio de recubrimientos de óxido de cromo aplicados por proyección térmica a la llama
Método NOBA	<ul style="list-style-type: none"> Algoritmo baja complejidad. Reducción del número de corridas. Fracción ortogonal y balanceada. 	<ul style="list-style-type: none"> Reciente creación. Pocas aplicaciones. Existen diseños infraccionables. 	<ul style="list-style-type: none"> Incremento en la producción de esporas de Trichoderma.
Box-Behnken	<ul style="list-style-type: none"> Son diseños económicos y particularmente útiles cuando es costoso llevar a cabo las pruebas experimentales. Por lo general tienen menos puntos de diseño y, por consiguiente, resulta menos costoso ejecutarlos con el mismo número de factores. Pueden estimar eficientemente los coeficientes de primer y segundo orden. 	<ul style="list-style-type: none"> No incluye los vértices de la región experimental como tratamientos. Solo aplica para tres o más factores. Siempre tienen tres niveles por factor. 	<ul style="list-style-type: none"> Condiciones óptimas de extracción de antioxidantes de <i>Decatropis bicolor</i>. Capacidad de adsorción de la fibra de fique en la remoción de Hg^{2+} en muestras de agua. Condiciones de cultivo de <i>Bacillus licheniformis</i> ATCC 14580. Optimización de la adsorción del colorante azul ácido sobre residuos de flores

Fuente: Elaboración propia.

Existe suficiente información en la bibliografía para poder identificar las principales dificultades de aplicar DOE, pero toda la información esta dispersa a lo largo de diversos artículos en distintas revistas, con muchos conceptos repetidos y en ocasiones subjetivos sin abordar totalmente las dificultades que se presentan al intentar aplicar DOE.

Como menciona Costa [2020] este tema es de suma importancia para poder identificar los errores en la aplicación de los DOE.

A través de la búsqueda bibliográfica se identificaron los factores publicados por los cuales el diseño de experimentos no tiene un uso masivo en la industria:

- Resistencia al cambio
- Recursos insuficientes.
- Trabajo en equipo débil.
- Conocimientos estadísticos escasos.
- Ausencia de bases teóricas para poder resolver problemas en la industria.
- El DOE no se enseña a los ingenieros en la universidad.
- Mala consultoría estadística.
- Vocabulario muy técnico para explicar DOE.
- Las publicaciones no llegan a los ingenieros.
- Falta de metodologías que guie a los usuarios.

Son diversas las dificultades documentadas, podemos ver que son barreras que tienen que ver tanto con las empresas (resistencia al cambio, recursos insuficientes, trabajo en equipo débil), con la formación profesional (conocimientos estadísticos escasos, ausencia de bases teóricas, el DOE no se enseña a los ingenieros en la universidad), prácticas deficientes en consultorías (mala consultoría estadística, vocabulario muy técnico para explicar DOE), y de divulgación (las publicaciones no llegan a los ingenieros, falta de metodologías)

5. Conclusiones

A pesar de que el diseño de experimentos se define como una herramienta eficaz para mejorar y optimizar procesos y productos, su aplicación hoy en día no es muy habitual en las empresas. La industria y los ingenieros utilizan limitadamente las técnicas estadísticas avanzadas para la experimentación, para lo cual usan en general otras estrategias, normalmente menos eficientes. Por ello el presente trabajo de revisión pretende acercar y difundir las diversas metodologías de DOE

que están disponibles y que han sido aplicadas satisfactoriamente. Son pocos los casos de aplicación en la industria, pero lo revisado demuestra que son una herramienta útil y que llevada de una forma correcta puede impactar significativamente en la eficiencia tanto de productos como procesos. Contrario a lo que se pudiera pensar son de fácil aplicación y no requieren de gran conocimiento estadístico o de programación. Existen metodologías DOE distintas que se pueden aplicar de acuerdo con el problema de interés, debemos identificar claramente de inicio los factores y variable de respuesta, así como las características inherentes para poder seleccionar la metodología adecuada.

6. Bibliografía y Referencias

- [1] Prat, A., Martorell, X., Grima, P., Pozueta, L., Solé, I. (2000). Métodos estadísticos. Control y mejora de la calidad. Barcelona: Ediciones UPC.
- [2] Hunter, W. (1975). 101 ways to design an experiment. Wisconsin: University of Wisconsin, Madison.
- [3] Antony, J.; Chou, T.; Ghosh, S. Training for Design of Experiments. Work Study, 2003, Vol. 52, N° 7, p. 341-346.
- [4] Ryan, T. (2007). Modern experimental design. John Wiley & Sons Inc.
- [5] Duarte-Muñoz A, Pantrigo-Fernández JJ y Gallego-Carrillo M. Madrid (2007). "Metaheurísticas". Editorial Dikonson.
- [6] Lye, L.M. Tools and toys for teaching design of experiments methodology. 33rd Annual General Conference of the Canadian Society for Civil Engineering. 2005. Toronto, Ontario, Canada.
- [7] Montgomery, D. (2005). Diseño y análisis de experimentos. Mexico: Limusa.
- [8] Box, G., & Drapen, N. (2007). Response surfaces, Mixtures, and Ridge Analuse. Wisconsin: Wiley.
- [9] Fowlkes, W., & Creveling, C. (1995). Engineering methods for robust product design. Boston: Addison-Wesley.
- [10] Pantoja, Y., Rios, A., & Tapia, M. (2019). A method for construction of mixed-level fractional designs. Quality and Reliability Engineering International, 35, 5-12.

- [11] Box, G. & Behnken, D. (1960). Some new three level design for the study of quantitative variables. *Technometrics* 2.4, 455-475.
- [12] Hernández R.; Fernández, C. & Baptista, P. (2003). *Metodología de la investigación*. México: McGraw-Hill.
- [13] Anderson, M. (2005). Trimming the FAT out of Experimental Methods. *OE magazine*, 32-33.
- [14] Mulatu, A., Alemu, T., Megersa, N., & Vetukuri, R. (2021). Optimization of Culture Conditions and Production of Bio-Fungicides from *Trichoderma* Species under Solid-State Fermentation Using Mathematical Modeling. *Microorganisms*, 3-4.
- [15] Del Angel, M., García, P., Lagunes, L., García, R., & Cabrera, E. (2015). Aplicación de la metodología de superficie de respuesta para la degradación de naranja de metilo con Ti-O sol-gel sulfatado. *Int. Contam. Ambie.*, 99-106.
- [16] Muñoz, J., Camargo, D., & Gallego, D. (2009). Aplicación de la metodología de superficie de respuesta en un proceso de absorción del CO de un biogás en una solución alcalina. *Dyna*, 135-144.
- [17] Fernández, L., Del pozo, P., Fernández, L., & Herrera, R. (2020). Utilización de la metodología de superficie de respuesta para modelar los cambios en la productividad de *Cynodon nlemfuensis* Vanderyst. *Pastos y Forrajes*.
- [18] Villar, F., Millán, F., Cimeta, D (2007). Uso de la metodología de superficie de respuesta en el estudio del protocolo de mezcla para obtención de emulsiones concentradas O/W. *Interciencia*, 11-19.
- [19] Zapata, A., & Sarache, W. (2014). Mejoramiento de la calidad del café soluble utilizando el método Taguchi. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería.*, 116-124.
- [20] Medina, P., Cruz, E., & Restrepo, J. (2007). Aplicación del modelo de experimentación Taguchi en un ingenio azucarero del Valle del Cauca. *Scientia et Technica*, 337-341.
- [21] Méndez, L., Olaya, J. (2015). Aproximación del método Taguchi para el estudio de recubrimientos de óxido de cromo aplicados por proyección térmica a la llama. *Rev. LatinAm. Metal. Mater.*

- [22] Báez, Y., Limón, J., Tlapa, D., & Rodríguez, M. (2010). Aplicación de Seis Sigma y los Métodos Taguchi para el Incremento de la Resistencia a la Prueba de Jalón de un Diodo Emisor de Luz. *Información Tecnológica*, 63-76.
- [23] Yáñez, O., Ríos, A., Pantoja, V., Jiménez, J., Vazquez, J., & Hernández, S. (2023). Increase of *Trichoderma harzianum* production using mixed level fractional factorial design. *Applied sciences*.
- [24] Contreras, E., Hernández, T., Jaimez, J., Pérez, J., Gutiérrez, J., & Ramírez, J. (2023). Aplicación de un Diseño de Experimentos Box-Behnken para la determinación de las condiciones de extracción de compuestos antioxidantes de *Decatropis bicolor*. *Investigación y Desarrollo en Ciencia y Tecnología de Alimentos.*, 667-675.
- [25] Reyes, P., & Pérez, E. (2022). Aplicación de diseños experimentales al proceso de biosorción de Hg²⁺ empleando el residuo agroindustrial de fique. *ABQ*, 1-5.
- [26] Jaramillo, A., Echavarría, A., Hormaza, A. (2013). Diseño Box-Behnken para la optimización de la adsorción del colorante azul ácido sobre residuos de flores. *Ingeniería y ciencia*, 75-91.
- [27] Erazo, S., & Daniela, A. (2020). Optimización de las condiciones de cultivo de *Bacillus licheniformis* atcc 14580 para la obtención de α -amilasas mediante la aplicación de diseños experimentales. Quito: Universidad de las Américas.
- [28] Costa, N. (2006). Guidelines to help practitioners of Design of experiments. *TQM Magazine*, 386-399.