



Parámetros óptimos de operación de una máquina estampadora a través de análisis estadístico experimental

Optimal operating parameters of a pressing machine through statistical experimental analysis

Parâmetros de operação ótimos de uma máquina de pressão através de análise experimental estatística

Jaime Iván Acosta-Velarde¹

ji_acosta@esepoch.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0002-1034-7839>

Correspondencia: ji_acosta@esepoch.edu.ec

Ciencias de la Salud
Artículos de investigación

***Recibido:** 16 de junio de 2021 ***Aceptado:** 31 de julio de 2021 * **Publicado:** 17 de agosto de 2021

- I. Magíster en Ingeniería Industrial y Productividad, Ingeniero Industrial, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Riobamba, Ecuador.

Resumen

El presente artículo muestra un caso de estudio aplicado en una importante empresa del sector textil que produce prendas de vestir principalmente deportivas con estampado. El equipo analizado es una estampadora en la cual, a través del proceso transfer, se puede realizar impresiones sobre telas de algodón de diferentes colores. El problema en el proceso es una tasa elevada de prendas estampadas con defectos que afectan la calidad y los costos de producción debido a los parámetros de operación de la máquina. Por tal motivo, se aplicó el diseño de experimentos DoE (Design of Experiments) y la técnica estadística ADEVA (Análisis de Varianza) con el objetivo de mejorar el proceso productivo del equipo, dando como resultado la determinación y fijación de los parámetros óptimos de operación de la estampadora logrando una reducción de la tasa media de defectos de 10% al 4% y consecuentemente un incremento de la calidad y productividad.

Palabras claves: Análisis de Varianza; Operación óptima; Diseño experimental no replicado; Tratamiento; Calidad.

Abstract

This article shows a case of study applied to an important textile company that produces mainly sportswear with print. The equipment analyzed is a printing machine in which, through the transfer process, it is possible to make prints on cotton of different colors. The problem in the process is a high rate of garments printed with defects that affect quality and production costs due to the operating parameters of the machine. For this reason, the design of experiments DoE (Design of Experiments) and the statistical technique ANOVA (Analysis of Variance) were applied to improve the production process of the equipment, resulting in the determination of the optimal operating parameters. achieving a reduction in the average defect rate from 10% to 4% and consequently an increase in quality and productivity.

Keywords: Variance analysis; Optimal operation; Non-replicated experimental design; Treatment; Quality.

Resumo

Este artigo apresenta um caso de estudo aplicado a uma importante empresa têxtil que produz principalmente roupas esportivas com estampa. O equipamento analisado é uma impressora na qual, por meio do processo de transfer, é possível fazer estampas em algodão de diversas cores. O problema no processo é um alto índice de peças impressas com defeitos que afetam a qualidade e os custos de produção devido aos parâmetros de funcionamento da máquina. Por este motivo, o desenho de experimentos DoE (Design of Experiments) e a técnica estatística ANOVA (Analysis of Variance) foram aplicados para melhorar o processo de produção do equipamento, resultando na determinação dos parâmetros operacionais ótimos, conseguindo uma redução na taxa média de defeitos de 10% para 4% e conseqüentemente um aumento da qualidade e produtividade.

Palavras-chave: Análise de variação; Operação ótima; Desenho experimental não replicado; Tratamento; Qualidade.

Introducción

Actualmente las empresas enfrentan nuevos desafíos para mejorar la competitividad y productividad principalmente motivados por factores como la globalización, el desarrollo tecnológico y el surgimiento de nuevas empresas. La experimentación en la industria se ha convertido en una estrategia clave que contribuye al aprendizaje y a la mejora de los procesos y productos, conseqüentemente se logra incrementar la productividad y calidad de estos. (Tanco & Ilzarbe, 2008)

Los Diseños Experimentales se presentan como técnicas estadísticas efectivas para entender y optimizar los procesos y productos con base en la información obtenida a través de la experimentación, sin embargo, su uso no es muy habitual en la industria debido a que existen barreras que dificultan su aplicación, entre las cuales se puede mencionar, los costos asociados a la investigación y experimentación así como la necesidad de conocimientos avanzados en estadística y procesos de planeación de experimentos (Gordon & Buitriago, 2015). La mayoría de los problemas industriales, están condicionadas por el tiempo y el presupuesto, lo que supone una limitación importante a la hora de experimentar.

La experimentación proporciona la descripción aproximada de cómo se comportan los procesos y/o productos, restringida a una región de interés. La mejora de los procesos es generalmente el objetivo hasta que este alcanza el nivel deseado. El reto en la experimentación es como obtener la mayor cantidad de información posible y de la manera más eficiente (Ryan, 2007)

Los modelos experimentales con técnicas estadísticas se han convertido en herramientas potentes para el diseño y mejoramiento de productos y procesos que conducen a las empresas alcanzar niveles competitivos en cuanto a calidad y productividad.

De acuerdo con la literatura, las estrategias más utilizadas para llevar a cabo procesos de experimentación se clasifican en las siguientes categorías: Un factor a la vez y Diseño de Experimentos (Gutiérrez Pulido & De la Vara Salazar, 2012), el primero consiste en evaluar los efectos individuales de cada factor por separado sobre la variable respuesta, se basa en el método científico sin embargo no es eficiente para determinar las condiciones óptimas en las que debe operar el proceso y tampoco detecta las interacciones entre los factores. El Diseño de Experimentos es una metodología estadística efectiva para planificar, ejecutar y analizar correctamente pruebas experimentales articulada con lo establecido por Deming (considerado uno de los padres de la calidad) quien afirma que “no hay conocimiento que pueda contribuir tanto a mejorar la calidad, la productividad y la competitividad como el de los métodos estadísticos” (Deming, 1982)

El DoE, consiste en aplicar sistemáticamente la estadística y optimizar el proceso de experimentación al realizar las pruebas experimentales manipulado deliberadamente los parámetros de operación y control de un proceso o sistema con el fin de identificar los efectos significativos sobre una o más variables respuestas del proceso y determinar las condiciones óptimas en las que debe configurarse los parámetros para mejorar el proceso. (García Lesso, 2012)

La experimentación es un proceso en la que se inducen cambios deliberados en las variables de estudio (factores) para observar su efecto sobre variables de respuesta tales como características de un proceso o producto. Montgomery (2013) establece que para llevar a cabo una serie de pruebas experimentales es necesario considerar al menos dos niveles por factor. Así, los tratamientos se definen como la combinación de los niveles de los factores cuyo análisis permite determinar las condiciones óptimas en las que debe operar una máquina, un proceso o un producto.

A medida que aumentan los factores de estudio, los tratamientos se incrementan de forma exponencial, lo cual trae consigo un incremento en la utilización de recursos y por tanto costos sustanciales de experimentación por tanto es una desventaja de los diseños experimentales factoriales

Los diseños experimentales son herramientas estadísticas que permiten lograr soluciones óptimas en el menor tiempo posible y la confiabilidad de los resultados aumenta cuando se cumplen los supuestos como normalidad de los residuos, homogeneidad de varianza e independencia. (Saldaña Ruiz, Ramírez Tapia , Ríos Lira, & Henández Ripalda, 2020)

Un Diseño Factorial 2^4 no replicado consiste en estudiar 4 factores con dos niveles por factor y un total de 16 tratamientos. Son diseños experimentales utilizados con frecuencia en la industria debido a su flexibilidad y moderadas pruebas de experimentación. La combinación de los principios de diseño experimental con la tecnología incrementa la mejora de los procesos a nivel industrial. (Yu, Pelaez, & Lang, 2016)

La aleatorización durante la realización del experimento es esencial para evitar la dependencia entre las muestras y asegurar que los resultados sean realmente causados por las variables dependientes y no por el experimentador. (Garza Villegas, 2013)

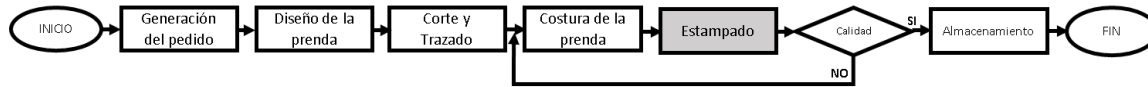
Descripción del proceso

La empresa ha sufrido una creciente demanda de prendas textiles a nivel nacional, la mayoría de las prendas fabricadas pasan por un proceso de sublimado para cumplir con los requerimientos del cliente. Para el estudio, considerando los parámetros de producción de la empresa se selecciona el proceso de estampado para sellos y los diferentes distintivos en vinil para prendas deportivas ya que corresponden a sus productos con mayor demanda, sin embargo, la producción mensual es aproximadamente 800 unidades fabricando lotes de producción de 80 prendas con un porcentaje de defectos del 10%, este indicador es de considerable preocupación para los directivos, ya que representa una pérdida significativa de recursos y ganancias para la empresa.

El proceso inicia con el diseño y preparación de la prenda, posteriormente se diseña y elabora el estampado de acuerdo con el requerimiento del cliente. La prenda y el estampado se colocan en la máquina estampadora, se configuran los parámetros de operación de la máquina, se genera el proceso de estampado por medio del método transfer y después de una inspección se determina

la calidad del producto final el cuál será almacenado para posteriormente entregado al cliente (Figura 1)

Fig. 1 Diagrama de flujo del proceso



El proceso transfer consiste en un papel vinilo delgado al cual se le imprime una imagen, a continuación, este papel vinilo se lo pega a la camiseta o artículo y por medio de calor provocada por la máquina la imagen es estampada. El transfer está diseñado para imprimir sobre camisas blancas y camisetas de colores

Metodología

Para el presente estudio se utilizó la base de datos obtenida a partir de ensayos experimentales realizados en una máquina estampadora, Los ensayos correspondieron a pruebas experimentales combinando los distintos niveles establecidos para cada factor de interés. Se consideró aplicar dos niveles por factor.

La planificación del modelo experimental es la más importante, ya que de esta dependerá el grado de eficiencia en los resultados del experimento, se debe considerar lo siguiente:

Concepción del problema de estudio.

Determinación de la variable respuesta apropiada, que refleje los resultados de las pruebas a ejecutar. La decisión de seleccionar la variable respuesta es la más importante. La respuesta elegida es de tipo binaria y corresponde al porcentaje de prendas defectuosas calculado como el cociente entre el total de prendas defectuosas y el total de prendas producidas por lote. Se seleccionó una muestra por tratamiento. El tamaño de la muestra se calculó utilizando la ecuación 1, con un nivel de confianza del 95 %, un error de estimación del 5 % y un porcentaje promedio de defectos del 10 % correspondientes a los 3 últimos meses antes del análisis dando como resultado una muestra de 50 unidades por tratamiento

$$n = \frac{NZ^2pq}{(N-1)e^2 + Z^2pq} \quad (1)$$

Identificación de los factores de estudio, que intervienen directamente sobre la salida o respuesta del proceso. Los factores de estudio y los respectivos niveles de cada factor se muestran en la

tabla 1. Los demás factores se mantuvieron fijos para el experimento. Por razones de confidencialidad se omite el nombre de la empresa y los valores específicos de los parámetros en los cuales se realizaron los experimentos.

Tabla 1. Valores nominales de los factores de interés

FACTOR	CÓDIGO	NIVELES	
		BAJO	ALTO
Temperatura Transfer (°C)	A	-	+
Presión de estampado (Mpa)	B	-	+
Tiempo transfer (s)	C	-	+
Tiempo de enfriado (s)	D	-	+

Elección del diseño experimental, se consideró un diseño experimental factorial 24 no replicado porque se analizan 4 factores con dos niveles cada uno y con una sola replica. Posteriormente se realiza el análisis estadístico de los tratamientos con el método ADEVA (análisis de varianza) con el propósito de determinar el nivel adecuado de cada factor que proporcione el menor porcentaje de defectos.

Se aplicó el principio de aleatoriedad para las corridas experimentales que permite reducir la variabilidad de los datos causada por errores de experimentación y aleatorios.

En el proceso existen otros factores importantes que podrían influir en el proceso, como tipo de tela, tipo de vinil y posición, a pesar de ello, estos factores no se consideraron importantes de acuerdo con la experiencia del fabricante, por lo que se mantuvieron constantes durante las pruebas experimentales, así como otros factores fueron considerados ruidos, porque son imposibles de modificar bajo circunstancias normales del proceso como la actitud de los empleados.

Al tratarse de un diseño factorial no replicado, con los datos obtenidos se calculan los efectos para la elaboración del ADEVA. El procedimiento consiste en identificar aquellos efectos significativos los cuales se observan en el diagrama de Pareto de efectos y son utilizados para el ADEVA. Los efectos poco significativos son enviados al error aleatorio que es un componente principal para el análisis de varianza de los tratamientos.

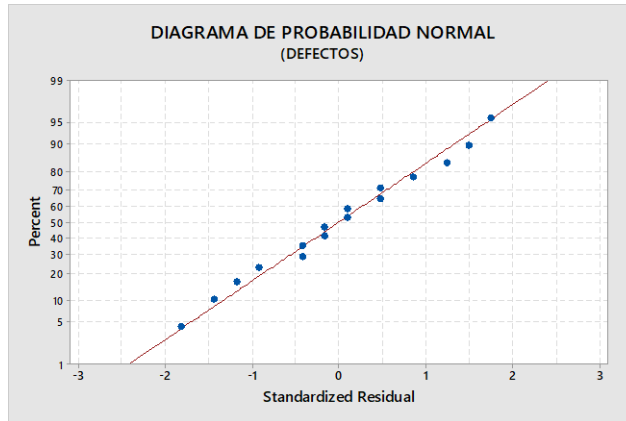
La ejecución de las pruebas experimentales se llevó a cabo en el orden en que fueron aleatorizados. Los lotes producidos en cada tratamiento son inspeccionados para determinar la cantidad de unidades defectuosas presentes en relación con el total de unidades fabricadas (Tabla 2.). Posteriormente para el análisis estadístico del modelo experimental se utilizó el programa estadístico Minitab v19.

Tabla 2. Variable respuesta por tratamiento.

TRATAMIENTO	Temperatura transfer (°C)	Presión de estampado (Mpa)	Tiempo transfer (seg)	Tiempo de enfriado (seg)	% DEFECTOS
1	-	-	-	-	20%
2	+	-	-	-	8%
3	-	+	-	-	18%
4	+	+	-	-	22%
5	-	-	+	-	10%
6	+	-	+	-	12%
7	-	+	+	-	16%
8	+	+	+	-	14%
9	-	-	-	+	10%
10	+	-	-	+	14%
11	-	+	-	+	18%
12	+	+	-	+	10%
13	-	-	+	+	4%
14	+	-	+	+	22%
15	-	+	+	+	6%
16	+	+	+	+	24%

Uno de los principales supuestos que deben cumplir los diseños experimentales es el supuesto de normalidad para explicar un correcto procedimiento de las pruebas experimentales, lo que contribuye a realizar un ADEVA confiable (Figura 3)

Figura 3. Diagrama de Normalidad de los residuos



A través del ADEVA se determinan los factores, así como las interacciones que pueden tener efecto significativo sobre el proceso, con base en la producción de prendas defectuosas. Posteriormente las gráficas de interacción y efectos principales son evaluadas para obtener una correcta interpretación de los resultados.

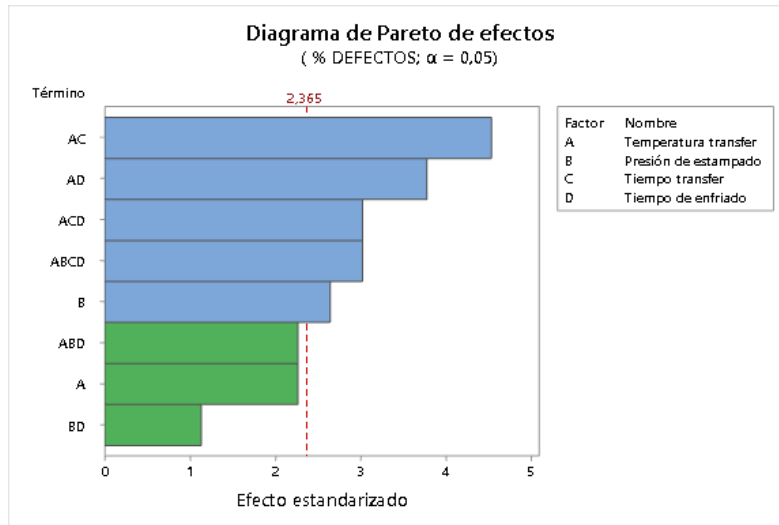
Se calcula el coeficiente de determinación que explica el porcentaje de la variabilidad explicada por los factores bajo estudio, éste es un indicador importante que le otorga confiabilidad a la toma de decisiones concretas.

Con los datos obtenidos de la experimentación se analiza el porcentaje de defectos y se aplica la prueba de comparación múltiple LSD (least significant difference) por sus acrónimos en inglés conocida también como Diferencia Mínima Significativa con un nivel de confianza del 95%, técnica que permite determinar el Intervalo de variabilidad de cada tratamiento.

Resultados

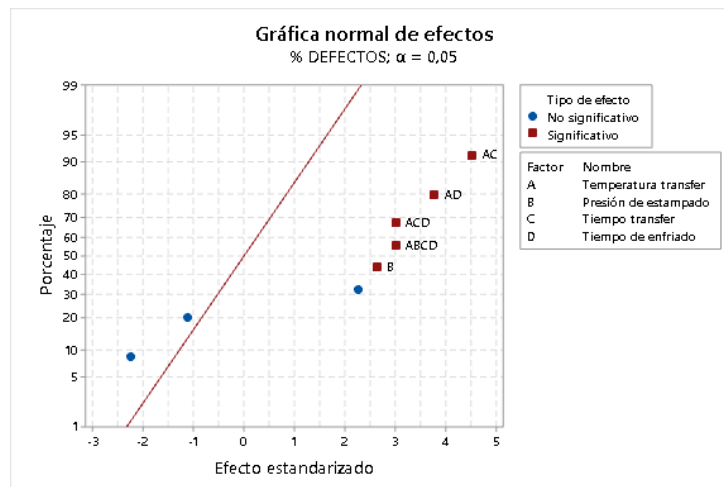
Para incrementar la potencia del análisis, los grados de libertad del error deben ser superior a los 7 (Gutiérrez, 2012). Esto se corrige al enviar aquellos efectos observados no significativos al error. Este proceso permite generar un ADEVA mejorado cuyo enfoque está orientado a determinar con mayor precisión el efecto de los factores. Con los datos obtenidos aplicando el diseño factorial 2^4 no replicado y a través de la gráfica de Pareto (Figura 4) se observa la magnitud de los efectos principales y de interacción sobre la variable respuesta denotando significativamente influyentes aquellos efectos que están por encima del valor crítico (2,365) de la distribución t de Student.

Figura 4. Diagrama de Pareto de efectos



La gráfica de normalidad de Daniel, utilizada conjuntamente con la de Pareto muestra también con claridad aquellos tratamientos significativos que afectan el proceso de estampado. Tal como se muestra en la figura 5.

Figura 5. Diagrama de normalidad de Daniel



Con un nivel de confianza del 95 % al aplicar el ADEVA (Tabla 3) muestra que la presión de estampado, dos interacciones dobles, una interacción triple y la interacción cuádruple tienen efecto significativo sobre el porcentaje de prendas defectuosas provocadas por el proceso de estampado en la fabricación de prendas deportivas.

Tabla 3. Análisis de Varianza

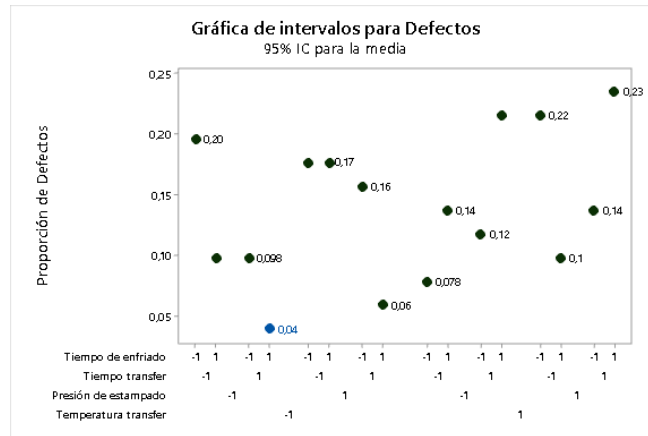
Fuente de variación	GL	SC	CM	F ₀	F _(0.05, 1, 7)	Criterio de Decisión
Temperatura Transfer	1	0,0035	0,0035	5,14		NS
Presión de estampado	1	0,0047	0,0047	7,00		S
Temperatura Transfer * Tiempo transfer	1	0,0138	0,0138	20,57		S
Temperatura Transfer *Tiempo de enfriado	1	0,0096	0,0096	14,29		S
Presión de estampado * Tiempo de enfriado	1	0,0009	0,0009	1,29		NS
Temperatura Transfer * Presión de estampado* Tiempo de enfriado	1	0,035	0,035	5,14	5,59	NS
Temperatura Transfer * Tiempo transfer * Tiempo de enfriado	1	0,0062	0,0062	9,14		S
Temperatura Transfer * Presión de estampado* Tiempo transfer *Tiempo de enfriado	1	0,062	0,062	9,14		S
Error	7	0,0047	0,00067			
Total	15	0,0530				

El coeficiente de determinación calculado con la ecuación 2, muestra que el 81 % de la variabilidad en los datos es explicada por los factores significativos, es decir que el diseño experimental es adecuado para el estudio.

$$R_{aj}^2 = \frac{CMT - CME}{CMT} * 100$$

Para minimizar la cantidad de defectos en las prendas producidas por la máquina durante el proceso de estampado y de acuerdo con la gráfica de intervalo de Diferencias Mínimas Significativas (Figura 6) se logra identificar las condiciones de operación óptimas para reducir el número de defectos. Esto indica que se debe configurar la máquina para operar con la temperatura transfer y la presión de estampado en sus niveles bajos, así como el tiempo transfer y el tiempo de enfriado en sus niveles altos, de esta manera se puede generar aproximadamente el 4 % de defectos que, comparado con el 10% de defectos antes del estudio representa un ahorro significativo en cuanto a tiempo de entrega y dinero ya que se reduce el consumo de recursos innecesarios debido a los reprocesos.

Figura 6. Gráficas de interacción



Los factores son de tipo cuantitativos por lo tanto se puede establecer un modelo de regresión en función de los factores que tienen efecto sobre la variable respuesta (ecuación 3). La aplicación de este modelo con los niveles de los factores codificados permite estimar el porcentaje de defectos provocados por el proceso de estampado dentro de la región de experimentación.

$$\% \text{ Defectos} = 0,14 + 0,017 * B + 0,029 * A * C + 0,024 * A * D + 0,02 * A * C * D - 0,02 * A * B * C * D \quad (3)$$

Donde:

- A Temperatura de transfer
- B Presión de estampado
- C Tiempo transfer
- D Tiempo de enfriado

Al aplicar el optimizador de respuesta con el software Minitab v19, se obtuvo el mismo resultado en cuanto a las condiciones óptimas en las que debe operar la máquina de estampado de tal forma que con un nivel de confianza del 95% el porcentaje de defectos variará entre 1,5% y 7,3% con un promedio ajustado de 4,4% (Tabla 4)

Tabla 4. Predicción de respuesta múltiple

Variable	Valor de nivel
Temperatura transfer	-1
Presión de estampado	-1
Tiempo transfer	1

	Tiempo de enfriado		1
		EE de	
Respuesta	Ajuste	ajuste	IC de 95%
% DEFECTOS	0,0441	0,0104	(0,0152; 0,0730)

Discusión

Las interacciones dobles entre la temperatura transfer con el tiempo transfer y el tiempo de enfriado respectivamente son predominantes durante el proceso de estampado de prendas de vestir, esto indica que la temperatura transfer esta condicionada por la variación del tiempo transfer y el tiempo de enfriado sobre el porcentaje de defectos como son los burbujas o mal estampado, sin embargo, la presión de estampado interactúa con los tres factores, es decir, la máquina estampadora debe ser configurada correctamente considerando los cuatro factores y sus respectivos niveles.

El uso de técnicas estadísticas para modelar experimentalmente el comportamiento operativo de máquinas facilita la configuración óptima de los parámetros de operación alcanzando mejoras significativas de indicadores de eficiencia del equipo y del proceso en sí, consecuentemente se observará el aumento de la productividad y calidad de los productos, sin embargo se debe considerar el costo que implica la experimentación, por lo que la planeación y ejecución del proceso experimental debe ser llevado a cabo cuidadosamente.

Entre los modelos experimentales factoriales empleados en la industria e investigación para modelar procesos, así como diseñar nuevos productos, el diseño experimental factorial 24 no replicado es utilizado por ser económico y flexible ya que solo se considera una medición por tratamiento, principalmente cuando es necesario evaluar procesos de producción a gran escala y es recomendable cuando el número de factores es superior a tres.

Conclusiones

El diseño experimental 24 no replicado conjuntamente con la técnica estadística ADEVA ha permitido determinar las condiciones en las que debe operar la maquina estampadora de prendas de vestir, logrando reducir el porcentaje de defectos de 10% al 4% aproximadamente. La variabilidad no explicada por el modelo representa el porcentaje relacionado con otros factores que no se han considerado en el estudio,

El coeficiente de determinación representa el 81% de la variabilidad respecto al porcentaje de prendas defectuosas que es explicada principalmente por la temperatura transfer, presión de estampado, tiempo de transfer y el tiempo de enfriado, otorgando confiabilidad de las decisiones respecto a la parametrización de la máquina estampadora.

La reducción de prendas con estampados defectuosos tiene como consecuencias la reducción de los costos por reprocesos, quejas por parte de los clientes y consecuentemente un aumento de la productividad, demostrando, de esta manera, que las técnicas estadísticas representan una excelente estrategia de mejora en los procesos de producción.

Referencias

1. Deming, W. (1982). *Out of crisis*. Cambridge, MA: MIT Center for Advanced Engineering Study.
2. Garcia Lesso, J. C. (Noviembre de 2012). *Aplicación de diseños de experimentos*. Obtenido de Centro Universitario Querétano: <http://ri.uaq.mx/xmlui/bitstream/handle/123456789/2150/RI001299.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
3. Garza Villegas, J. B. (2013). *Aplicación de diseño de experimentos para el análisis de secado de un producto*. *Innovaciones de negocios*, 145-158. Obtenido de http://www.web.facpya.uanl.mx/rev_in/
4. Gordón Mendoza, R., & Camargo Buitrago, I. (2015). *Selección de estadísticos para la estimación de la precisión experimental en ensayos de maíz*. *Agronomía Mesoamericana*, 26(1), 55-63. doi:<https://doi.org/10.15517/am.v26i1.16920>
5. Gutiérrez Pulido, H., & De la Vara Salazar, R. (2012). *Análisis y diseño de experimentos*. México: McGraw-Hill.
6. Montgomery, D. (2013). *Diseño y análisis de experimentos*. México: Limusa.
7. Ryan, T. (2007). *Modern Experimental Design*. John Wiley Sons, Inc.
8. Saldaña Ruiz, M., Ramírez Tapia, R., Ríos Lira, A., & Henández Ripalda, M. (2020). *Planeación para el desarrollo de un programa para desbalancear matrices de diseño en diseños factoriales 2k*. *Pistas Educativas*, 42(136), 838-852.
9. Tanco, M., Ilzarbe, L., & Viles, E. (2008). *Aplicación del Diseño de Experimentos (DoE) para la mejora de procesos*. *Facultad de Ingeniería. Universidad de Montevideo*(6), 10.

10. Yu, Y., Pelaez, A., & Lang, K. (2016). Designing and evaluating business process models: an experimental approach. *Information Systems and e-Business*, 767-789. doi:<https://doi.org/10.1007/s10257-014-0257-0>

© 2020 por los autores. Este artículo es de acceso abierto y distribuido según los términos y condiciones de la licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>)