



## Optimización de la eficiencia productiva a través de un diseño experimental factorial en el proceso productivo de prensado de suelas para calzado en una empresa textil

*Optimization of production efficiency through a factorial experimental design in the production process of pressing shoe soles in a textile company*

*Otimização da eficiência produtiva por meio de projeto experimental fatorial no processo produtivo de prensagem de solas de calçados em uma empresa textil*

Jaime Acosta-Velarde <sup>I</sup>

[ji\\_acosta@epoch.edu.ec](mailto:ji_acosta@epoch.edu.ec)

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

Jesús Brito-Carvajal <sup>II</sup>

[jbrito@epoch.edu.ec](mailto:jbrito@epoch.edu.ec)

<https://orcid.org/0000-0002-9056-0233>

**Correspondencia:** [jbrito@epoch.edu.ec](mailto:jbrito@epoch.edu.ec)

Ciencias técnicas y aplicadas  
Artículos de investigación

\***Recibido:** 16 de julio de 2021 \***Aceptado:** 30 de agosto de 2021 \* **Publicado:** 13 de septiembre de 2021

- I. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador.
- II. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador.



## Resumen

El presente artículo está orientado a optimizar la eficiencia productiva del proceso de inyección y prensado de suelas para calzado en una empresa de manufactura, a través de la estandarización del proceso y disminución del porcentaje de unidades defectuosas de acuerdo con el nivel de participación por máquina inyectora y prensa modelo XFP. La Planta de Inyección cuenta con una alta capacidad de producción en pares de suelas para calzado por día, sin embargo, no contaba con un procedimiento estándar, por tanto, la actividad de cada operario se basa en su conocimiento empírico en el manejo del equipo y de los materiales. El proceso de prensado sobre el material Eva fue considerado como un proceso conflictivo debido al porcentaje de defectos producidos en un 24%, principalmente por: porosidades en la suela, contaminación del material y quemado. La problemática en la prensa se resolvió a través de la aplicación de un diseño experimental 23, técnica utilizada para el estudio de los factores influyentes en el proceso como: temperatura, tiempos de prensado y peso del material. El análisis del diseño conllevó a establecer el nivel de efecto que tiene la interacción de los tres factores en el porcentaje de defectos; logrando un aumento de la producción y una disminución de unidades defectuosas a un 12% aproximadamente y un aumento de la productividad del 20%

**Palabras clave:** Análisis de varianza; eficiencia productiva; diseño experimental no replicado. tratamiento; calidad.

## Abstract

This article is aimed at optimizing the productive efficiency of the injection and pressing process of shoe soles in a manufacturing company, through the standardization of the process and reduction of the percentage of defective units according to the level of participation per injection machine and model XFP press. The Injection Plant has a high production capacity in pairs of soles for footwear per day, however, it did not have a standard procedure, therefore, the activity of each operator is based on their empirical knowledge in the handling of the equipment and of the materials. The pressing process on the Eva material was considered a conflictive process due to the percentage of defects produced in 24%, mainly due to: porosities in the sole, contamination of the material and burning. The problem in the press was resolved through the application of an experimental design 23, a technique used to study the factors influencing the process such as:

temperature, pressing times and weight of the material. The analysis of the design led to establish the level of effect that the interaction of the three factors has on the percentage of defects; achieving an increase in production and a decrease in defective units to approximately 12% and an increase in productivity of 20%

**Keywords:** Analysis of variance; productive efficiency; unreplicated experimental design. treatment; quality.

### **Resumo**

Este artigo tem como objetivo otimizar a eficiência produtiva do processo de injeção e prensagem de solas de calçado em uma empresa fabricante, por meio da padronização do processo e redução do percentual de unidades defeituosas de acordo com o nível de participação por injetora e prensa modelo XFP . A Planta de Injeção possui uma alta capacidade de produção em pares de solas para calçados por dia, porém, não possuía um procedimento padronizado, portanto, a atividade de cada operador é baseada no seu conhecimento empírico no manuseio dos equipamentos e dos materiais . O processo de prensagem no material Eva foi considerado um processo conflitivo devido ao percentual de defeitos produzidos em 24%, principalmente devido a: porosidades na sola, contaminação do material e queima. O problema na prensa foi resolvido com a aplicação de um desenho experimental 23, técnica utilizada para estudar os fatores que influenciam o processo como: temperatura, tempos de prensagem e peso do material. A análise do projeto levou a estabelecer o nível de efeito que a interação dos três fatores tem sobre o percentual de defeitos; alcançar um aumento na produção e uma diminuição nas unidades defeituosas para aproximadamente 12% e um aumento na produtividade de 20%

**Palavras-chave:** Análise de variância; eficiência produtiva; desenho experimental não replicado. tratamento; qualidade.

### **Introducción**

La industria a nivel mundial se ha visto estimulada por destinar sus recursos y esfuerzos a la mejora continua de los procesos productivos debido al incremento en la competitividad del mercado por la satisfacción del cliente. La industria de calzado a nivel nacional atraviesa por un crecimiento productivo significativo que al compararlo con los mercados internacionales aún no alcanza el nivel de competitividad debido a la escasa implementación de herramientas como estrategias de mejora.

La producción de plástico se ha incrementado notablemente debido a la facilidad y economía de transformación, en especial de los termoplásticos que permiten la fabricación de diversos productos a gran escala con costos relativamente bajos. Entre todos los procesos de transformación en los que se utiliza material plástico destaca el proceso de inyección que ha permitido que los materiales poliméricos estén reemplazando a metales, maderas, vidrios, logrando resolver necesidades del avance tecnológico. (Lesso García, 2012)

La empresa textil ubicada en la provincia de Tungurahua, cantón Ambato, está integrada por cuatro plantas de producción: elaboración de hilos, tisaje de algodón americano, tinturado de telas y de inyección, esta última comprende un proceso en el cual existe una máquina Prensa modelo XFP, la cual requiere mayor atención por el elevado porcentaje de desperdicios, la materia prima que ingresa a este equipo no puede ser reutilizada debido a la variación de su composición química después de ser prensado, motivo por el cual las pérdidas y los costos de producción se incrementan afectando directamente a la eficiencia productiva de la planta relacionada con: operarios, maquinaria, variabilidad del proceso, etc.

El proceso de transformación de los materiales plásticos que se lleva a cabo en las máquinas de inyección y prensa permite una producción a gran escala con costos relativamente bajos, así como ciclos rápidos de producción, fomentando el aumento del uso de los materiales plásticos en comparación a otros materiales. Sin embargo, el uso de los equipos de forma empírica implica que la selección de los parámetros de operación de los equipos se lo realiza a partir de prueba y error, en consecuencia, surgen varios problemas como incremento en el porcentaje de desperdicio, mayor cantidad de unidades defectuosas y tiempos de operación improductivos cuya consecuencia es la reducción del índice de calidad y productividad.

La producción de suelas, especialmente en materiales granulados, se maneja por lo general en procesos de inyección o son moldeadas en máquinas de compresión de acuerdo con el diseño del molde, con fines específicos de comodidad y confort, por ende, se busca disminuir el peso y garantizar la durabilidad en el calzado.

Los compuestos o combinaciones en la fabricación de suelas son diversos por mencionar: estireno, caucho, policloruro de vinilo (PVC), látex espumado, poliuretano (PU), termoplástico espumado (TR), acetato de vinilo (EVA), entre otros. (Herrera & Pineda, 2018)

Los modelos experimentales que se basan en 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.

El uso del software Minitab, facilita el manejo de los datos obtenidos en el proceso de inyección de plásticos, de tal manera que permite determinar la combinación ideal para el ahorro de materia prima en una pieza estándar que cumpla su calidad dimensional. (Ruiz Hernández, Zavala Bustos, Reyes Núñez, & Villalón Ramos, 2016)

La experimentación es un proceso en la que se inducen cambios deliberados en las variables de estudio (factores) para observar su efecto sobre variables respuesta de interés que pueden ser características de calidad de un producto. La combinación de los niveles de los factores se conoce como tratamiento usado para determinar las condiciones óptimas en las que debe operar una máquina, un proceso o un producto. (Montgomery, 2013)

Los diseños experimentales son herramientas estadísticas que permiten lograr soluciones óptimas en el menor tiempo posible; sin embargo, para lograr una alta confiabilidad de los resultados de los diseños experimentales se debe cumplir algunos supuestos tales como normalidad de los residuos, homogeneidad de varianza e independencia. (Saldaña Ruiz, Ramírez Tapia, Ríos Lira, & Henández Ripalda, 2020)

La interacción entre dos o más factores es estadísticamente significativa cuando el efecto de un factor depende del nivel en el que se encuentra el otro factor, independientemente de los principales de los factores. (Gutiérrez Pulido & De la Vara Salazar, 2012)

Un Diseño Factorial  $2^3$  es un diseño factorial de la familia  $2^k$  en el cual se estudian 3 factores con dos niveles por factor y un total de 8 tratamientos. Son utilizados con frecuencia en la industria debido a su flexibilidad. Se puede combinar los principios de diseño experimental y la tecnología para ayudar a mejorar los procesos a nivel industrial. (Yu, Pelaez, & Lang, 2016)

En un estudio para la optimización de los parámetros de trabajo con el fin de fortalecer la molienda por chorro de agua con ANFIS se utilizó el diseño de experimentos ortogonales, lo cual condujo a obtener un resultado óptimo del mecanizado de los anillos del rodamiento del equipo. (Liang, Liao, & Liu, 2019), esto indica que la precisión experimental está relacionada con la capacidad de encontrar diferencias entre los tratamientos evaluados. (Gordón Mendoza & Camargo Buitrago, 2015)

## **Factores de estudio**

La investigación experimental está orientada a la manipulación de variables con respecto a la Prensa XFP, siguiendo un proceso que engloba etapas como: delimitación de objetivos acorde del problema encontrado, desarrollo de la hipótesis de trabajo, elaboración del diseño experimental, realización del experimento, análisis de los resultados y obtención de las respectivas conclusiones del estudio planificado

Los factores considerados para el estudio, por su alto efecto que tienen en la fabricación de suelas de calzado son: tiempo de prensado, temperatura de prensado y peso dosificado

## **Proceso de prensado de suelas en material EVA**

La fabricación de suelas en material EVA es un proceso nuevo en el país, razón por la cual el manejo de los parámetros técnicos en la maquinaria hasta el momento es experimental y empírico. El proceso inicia con la orden de producción, consecutivamente se pesa el material EVA de acuerdo con el requerimiento analizado empíricamente por los operarios en una balanza electrónica, el compuesto se ubica en vasos plásticos y son transportados hacia la prensa XFP. El material es colocado de forma manual en los moldes y la máquina se encarga del proceso en función de los parámetros de control

Al cumplirse el tiempo de prensado establecido, se realiza la apertura del molde, se extrae la suela para realizar el control de calidad de acuerdo a las tallas deseadas y análisis de los posibles defectos. Si las medidas no son las adecuadas y la pieza no presenta defectos se envía a un túnel estabilizador que contiene compuertas a una determinada temperatura para encoger las suelas hasta el tamaño objetivo.

La máquina Prensa XFP para moldeo en material EVA es automática, controlada a través de una pantalla táctil para monitorear los movimientos y producción de la máquina. Esta prensa puede fabricar calzado, zapatillas, suelas, plantillas, etc

El Túnel se compone de diferentes estaciones que a través de un sistema de calefacción y transporte por banda permiten disminuir el tamaño del producto considerando que la velocidad de la máquina es regulable. Se debe tomar en cuenta que el artículo ingresado no va a mostrar cambios en su estructura química, únicamente en las características físicas

La temperatura del material aumenta gradualmente desde que este ingresa al molde hasta que se funde y se solidifica. Esta temperatura depende del tipo de material, y debe ser suficientemente alta

para permitir una fusión y homogenización adecuada del material a lo largo del molde de plastificación.

Una pieza formada se obtiene del proceso de inyección de plástico con el cierre del molde de forma hermética. En la etapa de enfriamiento el material se contrae, por lo que se añade más material para que el volumen de la pieza sea el deseado y se aplica una presión de compactación. El material permanece en el interior del molde hasta que el producto alcanza la temperatura de extracción y este listo para ser desmontado acelerando el tiempo de ciclo. (Beltrán & Marcilla, 2015, págs. 185-186)

La importancia de monitorear y controlar los factores de operación se debe a que la variabilidad de los factores provoca defectos como rechupes, diferencia de color y tamaño, consecuentemente genera aumento del índice de desperdicios haciendo que la productividad y la calidad de los productos se vean desmejoradas. Actualmente el tipo de prensa XFP, tomada como caso de estudio, genera un índice de defectos del 24% aproximadamente. Por tanto, surge la necesidad del estudio experimental que provea de información necesaria para responder al problema de una manera eficiente.

### **Metodología**

Para el presente estudio se utilizó la base de datos obtenida a partir de ensayos experimentales realizados en una máquina prensa modelo XFP, Los ensayos correspondieron a pruebas experimentales combinando los distintos niveles establecidos para cada factor de interés. Se consideró aplicar dos niveles por factor. Por razones de confidencialidad se omite el nombre de la empresa

La variable de respuesta elegida es: Porcentaje de defectos en cada corrida (un lote de producción). La planificación y ejecución del modelo experimental factorial inicia con la identificación de los factores críticos a ser estudiados y los respectivos niveles de cada factor (Tabla 1). Los demás factores se mantuvieron fijos para el experimento.

**Tabla 1:** Valores nominales de los factores de interés

REPRESENTACIÓN	FACTOR	NIVELES (s, °C, g)	
		Bajo (-1)	Alto (1)
<b>A</b>	Tiempo Prensado	10	20
<b>B</b>	Temperatura Prensado	165	185
<b>C</b>	Peso Dosificado	52	60

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

La ejecución de las pruebas experimentales se llevó a cabo en el orden en que fueron aleatorizados. El lote producido en cada tratamiento es analizado para determinar la cantidad de unidades defectuosas presentes en relación con el total de unidades fabricadas (Tabla 2.)

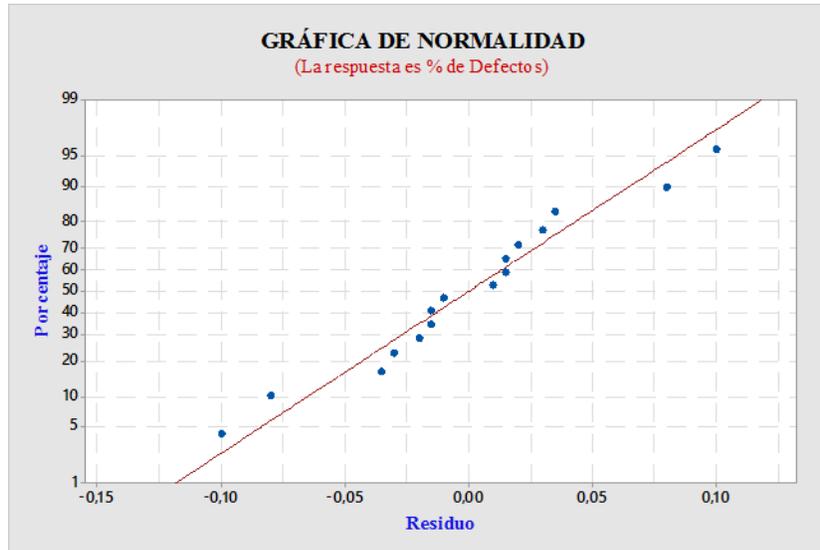
**Tabla 2:** Variable de salida por tratamiento.

TIEMPO	TEMPERATURA	PESO	% DE DEFECTOS
10	185	52	0,30
20	165	60	0,23
10	165	52	0,37
20	185	60	0,15
10	165	60	0,36
20	185	52	0,29
10	185	60	0,19
20	165	52	0,15
20	165	60	0,39
10	185	52	0,23
20	165	52	0,12
10	185	60	0,23
10	165	60	0,16
20	185	52	0,26
10	165	52	0,39
20	185	60	0,09

Con los datos obtenidos se determina uno de los principales supuestos que deben cumplir los diseños experimentales que es el supuesto de normalidad, requisito fundamental que explica un

correcto procedimiento de las pruebas experimentales, lo que contribuye a realizar un ANOVA confiable (Figura 3).

**Figura 3:** Diagrama de Normalidad de los residuos



Se aplicó el análisis de varianza que establece aquellos factores, así como las interacciones que pueden tener efecto significativo sobre el proceso, con base en la producción de unidades 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.

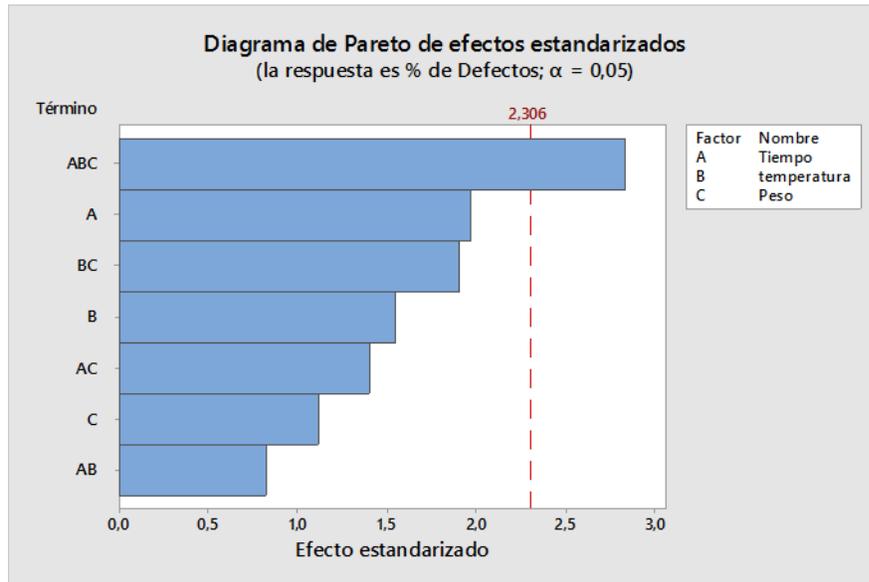
Con los datos obtenidos de la experimentación se analiza el porcentaje de defectos y se aplica la prueba de comparación múltiple LSD (least significant difference) por sus acrónimos en inglés conocida también como Diferencia Mínima Significativa (DMS) con un nivel de confianza del 95% técnica que permite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

## Resultados

A partir de los datos obtenidos aplicando el diseño factorial  $2^3$ , con dos replicas por tratamiento se determinan los efectos de los 3 factores, así como sus interacciones en la variable de salida (porcentaje de defectos).

Posteriormente, a través de la gráfica de Pareto (Figura 4) se observa la magnitud de los efectos principales y de interacción doble sobre la variable respuesta. Esto muestra con claridad aquellos tratamientos considerados significativos que afectan el proceso.

**Figura 4:** Diagrama de Pareto de efectos estandarizados



El ANOVA con un nivel de confianza del 95 % muestra que el tiempo de enfriamiento y tres interacciones dobles tienen efecto sobre el porcentaje de unidades defectuosas provocadas por el proceso de inyección de la máquina inyectora. (Tabla 3).

**Tabla 3:** Tabla ANOVA

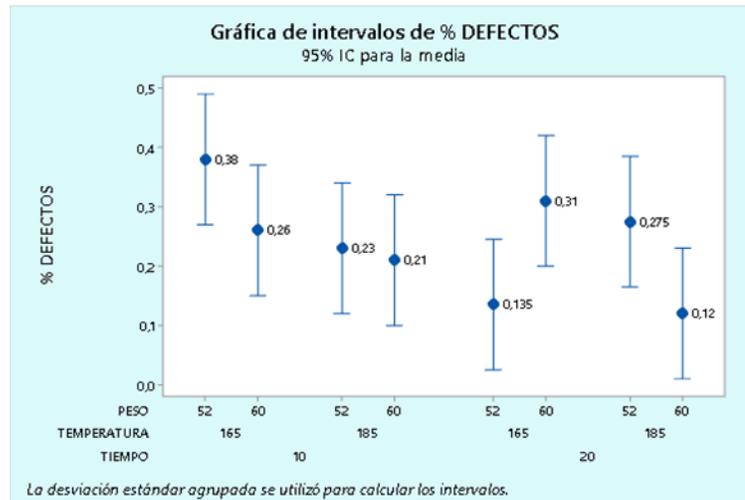
Análisis de Varianza					
Fuente de variabilidad	GL	SC	CM	Valor F	Valor p
Tiempo	1	0,018906	0,018906	3,88	0,084
Temperatura	1	0,011556	0,011556	2,37	0,162
Peso	1	0,006006	0,006006	1,23	0,299
Interacciones dobles					
Tiempo*temperatura	1	0,003306	0,003306	0,68	0,434
Tiempo*Peso	1	0,009506	0,009506	1,95	0,200
Temperatura*Peso	1	0,017556	0,017556	3,61	0,094
Interacción trile					
Tiempo*temperatura*Peso	1	0,039006	0,039006	8,01	0,022
Error	8	0,038950	0,004869		
Total	15	0,144794			

El coeficiente de determinación muestra que el 73,10 % de la variabilidad en los datos es explicada por los factores significativos, es decir que el diseño experimental es adecuado para el estudio.

$$R_{aj}^2 = \frac{CMT - CME}{CMT} * 100 = 73,10 \%$$

El objetivo de la investigación experimental es minimizar la cantidad de defectos en el proceso de la máquina prensa modelo XFP. Al aplicar el método LSD se obtienen gráficas de medias con intervalos (Figura 5) que permiten identificar la condición de operación óptima para reducir el número de defectos e indican que se debe operar con una temperatura de prensado de 185°C, tiempo de prensado de 20 minutos y un peso de 60 gramos dando como resultado un porcentaje de defectos promedio de 12% aproximadamente.

**Figura 5:** Gráficas de interacción triple



Adicionalmente, se establece un modelo de regresión en función de los factores que tienen efecto sobre la variable de salida. Este modelo se muestra a continuación:

$$Y = \beta_0 + \beta_7 x_1 x_2 x_3 \quad \rightarrow \quad Y = 35,4 - 0,000269 x_1 x_2 x_3$$

Donde:

- X<sub>1</sub> Tiempo de prensado
- X<sub>2</sub> Temperatura de prensado
- X<sub>3</sub> Peso dosificado

El modelo de regresión permite predecir valores del porcentaje de defectos que se pueden presentar al variar los niveles de los factores correspondientes a la región de experimentación.

Al aplicar el optimizador de respuesta con el software Minitab v19, se obtuvo el mismo resultado en cuanto a las condiciones óptimas en la que debe operar la máquina de inyección

La tabla 5 muestra que se puede obtener un porcentaje promedio de defectos de 12% por cada lote producido, al configurar la máquina con los parámetros determinados a través de la experimentación.

**Tabla 5.** Predicción de respuesta múltiple (MINITAB)

### Solución

Solución	TIEMPO	TEMPERATURA	PESO	% DEFECTOS Ajuste	Deseabilidad compuesta
1	20	185	60	0,12	0,9

La interacción entre el tiempo de prensado, temperatura de prensado y peso de dosificación es predominante durante el proceso de inyección y prensado de plástico para la elaboración de suelas para zapatos, esto indica que, a mayor tiempo de prensado, mayor temperatura de prensado y mayor peso de dosificación se reduce el porcentaje de defectos como son los rechupes, inyección incompleta, falta de color, entre otros

El uso de técnicas estadísticas para modelar experimentalmente el comportamiento funcional de equipos o maquinas facilita la configuración óptima de los parámetros de operación de tal manera que se logra mejorar indicadores de eficiencia del equipo y del proceso en sí, Esto se refleja en 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 del diseño experimental debe ser efectivo a la hora de seleccionar el modelo experimental.

Los modelos experimentales factoriales son los más utilizados en la industria e investigación, tanto para el modelado de procesos como diseño de productos, entre estos, el modelo experimental factorial 23 replicado. Los diseños experimentales factoriales se emplean por ser flexibles sobre todo cuando es necesario evaluar lotes en procesos de producción a gran escala.

## Conclusiones

El diseño experimental aplicado ha permitido determinar las condiciones en las que debe operar la maquina prensa XFP para producir suelas de plástico para zapatos, logrando reducir el porcentaje de defectos de 24% al 12% por ciento aproximadamente.

El coeficiente de determinación indica que el 73% de la variabilidad en cuanto al porcentaje de unidades defectuosas es explicada principalmente por tiempo de prensado, temperatura de prensado y peso de dosificación, otorgando confiabilidad de las decisiones que surjan con base en los resultados obtenidos.

Si se considera la productividad como la cantidad de producción sin defectos en una hora, entonces, el incremento de la eficiencia del proceso de producción de la empresa se verá reflejado con la reducción de unidades defectuosa por lote reducido, de esta manera se maximiza los recursos para alcanzar un nivel óptimo de producción.

La aplicación de los diseños experimentales y el conocimiento amplio del proceso que se desea estudiar permiten alcanzar soluciones efectivas que promueven el desarrollo y mejoramiento de los procesos en beneficio de la organización, la sociedad y la economía.

## Referencias

1. Beltrán, M., & Marcilla, A. (2015). Tecnología de Polímeros. Alicante.
2. Cesar., L. G. (2012). Aplicación del diseño de experimentos para la mejora del proceso de moldeo por inyección de plásticos de la pieza “fin instrument” en industrias Camca SA de CV.
3. 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>
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. Herrera, L., & Pineda, J. (2018). Evaluación de la mezcla de Etileno Vinil Acetato (EVA) con caucho natural o sintético, para la incorporación de la formulación de suelas de calzado de la compañía Croydon. Bogotá.
7. Lesso García, J. C. (2012). Aplicación del diseño de experimentos para la mejora del proceso de moldeo por inyección de plásticos de la pieza “fin instrument” en industrias Camca SA de CV. México: Universidad de Querétaro.
8. Liang, Z., Liao, S., & Liu, X. (2019). Working parameter optimization of strengthen waterjet grinding with the orthogonal-experiment-design-based ANFIS. *Journal of Intelligent Manufacturing* volume, 833-854.
9. Montgomery, D. (2013). *Diseño y análisis de experimentos*. México: Limusa.
10. Ruiz Hernández, R., Zavala Bustos, J. A., Reyes Núñez, M. d., & Villalón Ramos, V. M. (2016). Control de variables en el proceso de inyección de probetas plásticas. *Pistas Educativas*, 38(118), 255-262. Obtenido de <http://www.itcelaya.edu.mx/ojs/index.php/pistas/article/view/197>
11. 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.
12. 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>