



# DISEÑO FACTORIAL DE EXPERIMENTOS PARA DETERMINAR LOS FACTORES SIGNIFICATIVOS EN EL SOBREPESO DE UNA LÍNEA DE EMBUTIDOS EN UNA EMPRESA DE ALIMENTOS\*

Helmer Paz Orozco\*\*

Osman Meléndez Bermúdez\*\*\*

Nelson Paz Ruiz\*\*\*\*

Recibido: 17/01/2022 – Aceptado: 05/03/2025

<https://doi.org/10.22395/rium.v24n47a5>

## Resumen

El diseño de experimentos (DoE) se ha convertido en una estrategia potencial para analizar las condiciones de un proceso, debido a la eficiencia de la metodología para identificar los factores significativos en la variabilidad de un producto. En este sentido, este artículo de investigación presenta la aplicación de un diseño factorial de experimentos de cuatro factores y dos niveles para estudiar el efecto significativo en el sobrepeso de un embutido de una línea de producción en una empresa de alimentos en el departamento del Cauca. Los resultados determinaron que el sobrepeso es afectado significativamente por los  $\text{cm}^3$  o porción de llenado, además de analizar que una variable externa, como la temperatura, no ejercía efecto sobre el peso del embutido. La aplicación de este tipo de metodologías puede replicarse en un proceso de producción para monitorear, identificar y analizar los factores de mayor magnitud sobre la variable de respuesta.

*Palabras clave:* Control estadístico de procesos (SPC), diseño de experimentos (DoE), DMAIC, índices de capacidad de proceso  $C_p$  y  $C_{pk}$ .

\* Artículo derivado de una investigación terminada. Proyecto financiado por Corporación Universitaria Comfacauc – grupo de investigación Cadenas de Valor.

\*\* Corporación Universitaria Comfacauc – Facultad de Ingeniería. Correo electrónico: hpaz@unicomfacauc.edu.co. Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-1270-7981>.

\*\*\* Corporación Universitaria Comfacauc – Facultad de Ingeniería. Correo electrónico: osmanmelendez@unicomfacauc.edu.co. Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-3658-8152>

\*\*\*\* Corporación Universitaria Comfacauc – Facultad de Ingeniería. Correo electrónico: npaz@unicomfacauc.edu.co. Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-4010-4341>

## FACTORIAL EXPERIMENT DESIGN TO DETERMINE SIGNIFICANT OVERWEIGHT FACTORS IN A SAUSAGE LINE IN A FOOD COMPANY

### **Abstract**

Design of experiments (DoE) has emerged as a potential strategy for analyzing process conditions due to the methodology's effectiveness in identifying significant factors in product variability. Regarding this, this research article presents the application of a four-factor, two-level factorial experiment design to study the significant overweight of a sausage product on a food company production line in the Province of Cauca. Results determined that overweight is significantly affected by the  $\text{cm}^3$  or filling portion, and also showed that an external variable, such as temperature, did not affect sausage weight. Applying this type of methodology can be replicated in a production process to monitor, identify, and analyze the most significant factors affecting response variables.

**Keywords:** Statistical Process Control (SPC), Design of Experiments (DoE), DMAIC, process capability indices  $C_p$  and  $C_{pk}$ .

## INTRODUCCIÓN

Toda empresa debe esforzarse por mejorar continuamente en la calidad de sus productos si pretende competir con éxito en el mercado nacional e internacional [1]. Es por ello que, en este esfuerzo la utilización de métodos estadísticos son una herramienta importante para analizar, describir la variabilidad y mejorar los procesos [2-5].

Generalmente, todo proceso productivo genera algún tipo de información que debe ser analizada e interpretada para luego tomar alguna decisión al respecto [6-7]. La presencia de la variabilidad en los sistemas de producción es totalmente indeseable, pues puede causar altos costos de manufactura o pérdidas económicas en caso de no ser controlada [8-9].

De ahí que las metodologías estadísticas, para los investigadores de todos los campos de estudio, se han hecho prácticamente importantes para llevar a cabo pruebas con la intención de resolver algún problema o descubrir algo acerca de un proceso [6].

Por tal razón, una de las estrategias de experimentación para mejorar y obtener información necesaria de un sistema productivo es realizar una serie de pruebas o diseño de experimentos que tiene como fin determinar las pautas a seguir para obtener conclusiones estadísticamente objetivas y comprobar hipótesis [3].

Así, un Diseño de Experimentos (DoE) según diversos autores consiste en planear y realizar un conjunto de pruebas en las que se hacen unos cambios deliberados en las variables de entrada de un proceso para observar e identificar las causas de los cambios en la variable de respuesta [3, 6, 10].

Debido a la existencia de varios experimentos para estudiar un problema determinado, para esta investigación se utilizó un diseño factorial de experimentos que tiene como finalidad analizar el efecto de varios factores sobre una o varias respuestas [11-13].

En este contexto, la investigación realizada se orientó a determinar los factores influyentes en el incremento de peso del embutido de una línea de producción en una empresa de alimentos ubicada en el departamento del Cauca. Un proceso industrial está sometido a una serie de factores de carácter aleatorio que hacen imposible fabricar dos productos exactamente iguales [14-15]. En otras palabras, el producto presenta una variabilidad que causa que las características de este cambien en la respuesta de salida [16].

Debido a la inestabilidad del producto para mantenerse en el peso correspondiente en el área de estudio y la necesidad de identificar las variables influyentes en la desviación, este trabajo utilizó gráficos de control X-R, índices de capacidad de proceso  $C_p$

y  $C_{pk}$ , análisis de varianza y diseño factorial de experimentos como herramientas de apoyo del Control Estadístico de Procesos (SPC) [17-18], utilizando la metodología de Seis Sigma: Definir, Medir, Analizar, Mejorar y Controlar (DMAIC) [19].

## 1. METODOLOGÍA

La investigación utilizó la metodología de cinco fases Definir, Medir, Analizar, Mejorar y Controlar (DMAIC) de la filosofía Seis Sigma, una técnica orientada a la optimización de procesos a través de la reducción de la variabilidad y satisfacción del cliente [19-20].

En la figura 1 se puede observar la secuencia y la descripción del objetivo de cada fase para orientar la realización de la investigación. Teniendo en cuenta algunas aplicaciones y orientaciones realizadas en [14, 16, 20-21] a continuación se describe lo realizado en cada una de las fases:

*Definir:* para definir el embutido de mayor magnitud en las pérdidas económicas de la empresa fue necesario conocer los indicadores de sobrepeso y participación por referencia en costos de producción por un periodo de 1 año. El resultado fue priorizar el embutido para analizar las causas en el incremento de peso.

*Medir:* con el fin de identificar el comportamiento de las variables en el proceso de producción se analizó la estabilidad y capacidad de procesos a través del gráfico de control X-R e índices de capacidad  $C_p$  y  $C_{pk}$ , respectivamente.

*Analizar:* se utilizó un Análisis de Varianza (ANOVA) y un diseño experimental con el objetivo de analizar e identificar la influencia significativa de los factores en la variable de respuesta.

En este caso se llevó a cabo un diseño factorial completo de dos niveles y cuatro factores, en el cual se tomaron todas las observaciones aleatoriamente de las 57 combinaciones que pueden generarse entre los niveles de los factores presentados en la tabla 1, los cuales reciben el nombre de “tratamientos”. Para la presente investigación son de tipo cuantitativo; adicionalmente, se tomaron tres réplicas por cada uno de los tratamientos.

Tabla 1. Factores y niveles DoE

Factor	Unidades	Nivel bajo	Nivel alto
Velocidad	Unidades por minuto	409	430
Cm <sup>3*</sup>	Centímetros cúbicos [cm <sup>3</sup> ]	55,7	59,4
Retrosucción	Centímetros cúbicos [cm <sup>3</sup> ]	17	35
Torsión	Milímetros [mm]	3	3,3

\*Volumen o porción de llenado en el embutido.

Fuente: elaboración propia.

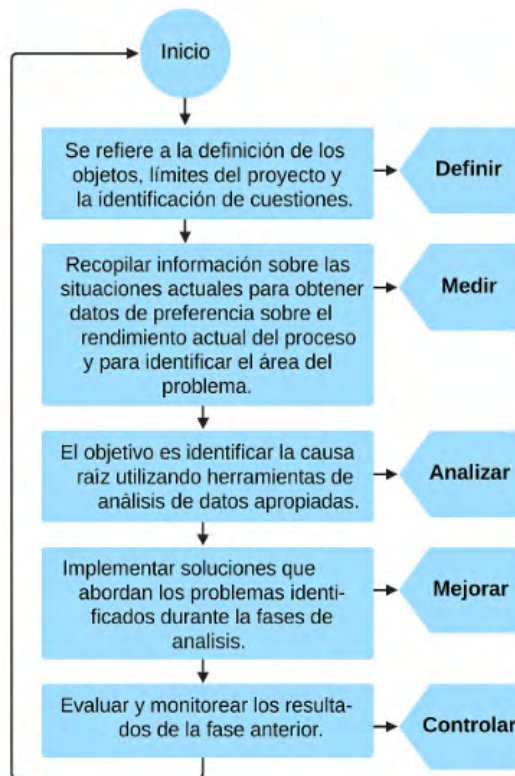
Así mismo, en esta fase se consideró la temperatura para realizar un análisis de varianza de un solo factor y determinar si ejercía algún efecto en el peso del embutido.

*Mejorar:* en esta fase se implementó una prueba piloto con los niveles que generó el optimizador de respuesta del software Minitab® 19, el cual es una herramienta que predice la combinación óptima de los niveles de cada factor para optimizar o cumplir un objetivo. En este caso, se utilizó para identificar la configuración factible de cumplir con un peso de 504 gramos.

*Controlar:* con el objetivo de evaluar los resultados de la fase anterior, se realizó un gráfico de control y un análisis de capacidad para observar el comportamiento de las variables y determinar si los resultados fueron satisfactorios.

La información recolectada en cada una de las fases se analizó por medio del software Minitab® 19, un programa especializado en ejecutar funciones estadísticas básicas y avanzadas.

Figura 1. Descripción de las fases DMAIC



Fuente: elaboración propia a partir de [16], [21].

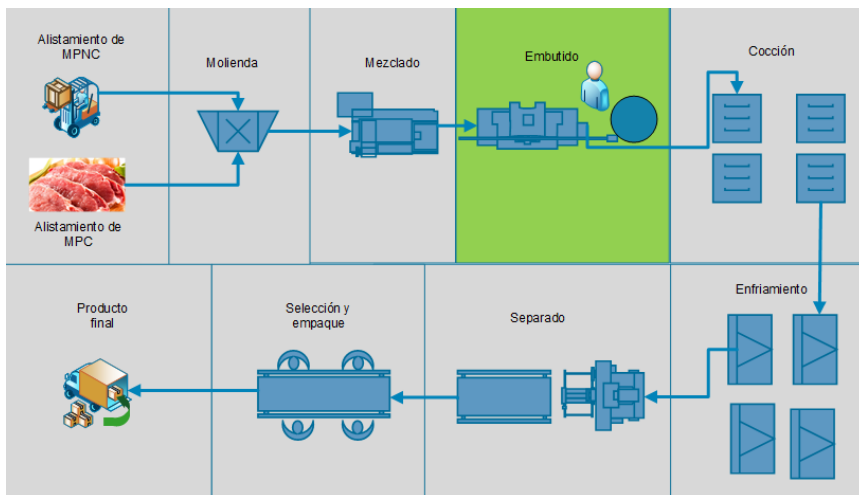
## 2. RESULTADOS

A continuación, se presentan los resultados obtenidos que corresponden a la secuencia de la aplicación de la metodología DMAIC y las herramientas estadísticas utilizadas como apoyo.

*Definir:* la selección del producto se realizó a través de indicadores sobre pérdidas económicas, sobrepeso y participación por referencia en costos de producción. Teniendo en cuenta que las operaciones en el proceso de producción son varias, el área de estudio para la investigación, como se puede observar en la figura 2, fue embutido. En esta etapa del proceso de producción, por requerimientos de la empresa, la referencia priorizada fue un peso ideal era de 504 gramos, con una tolerancia de  $\pm 2$  gramos. De forma que, en la etapa final o empaque, el producto tuviera un peso neto de 470 gramos en su empaque correspondiente a ocho unidades (producto terminado).

Se establece que el producto en las etapas siguientes al proceso de embutido tenía una reducción entre el 5 % y 7 % del peso total. Los objetivos definidos de acuerdo con lo presentado en la figura 1 son: determinación de los factores influyentes en la variación del peso y optimización del proceso (alcanzar el objetivo de 504 gramos).

Figura 2. Diagrama de proceso de producción de embutidos



MPNC: Materia Prima no Cárnica. MPC: Materia Prima Cárnica.

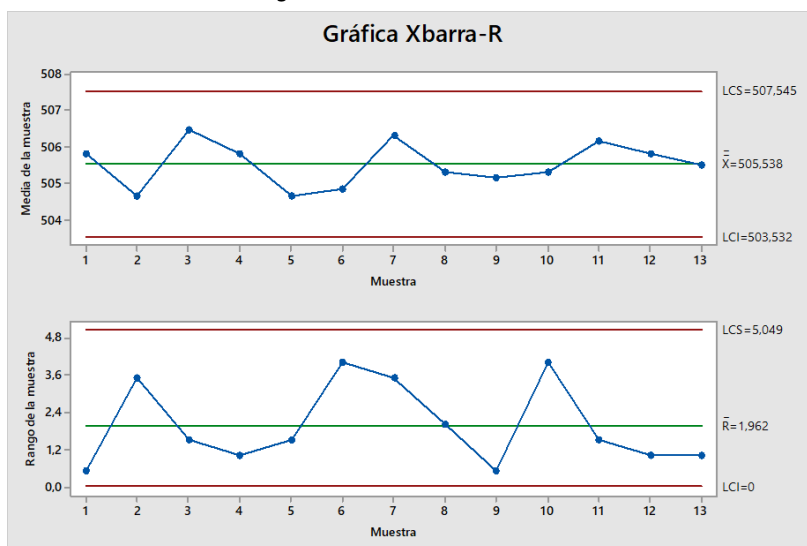
Fuente: elaboración propia.

*Medir:* para evaluar las variaciones es fundamental saber si son causas asignables o especiales [20]. Por tal razón, con el objetivo de reconocer el comportamiento de las variables en el proceso se procedió a realizar gráficos de control X-R e índices de capacidad de proceso  $C_p$  y  $C_{pk}$ .

La gráfica de control de medias y rangos (X-R) permite observar la tendencia de los datos registrados a través de un cierto periodo de tiempo para determinar si está bajo control estadístico, y los índices de capacidad permiten conocer la amplitud de la variación con respecto a su valor nominal para definir si cumple con las especificaciones requeridas [16].

De esta forma los resultados obtenidos son los siguientes:

Figura 3. Gráfico de control X-R



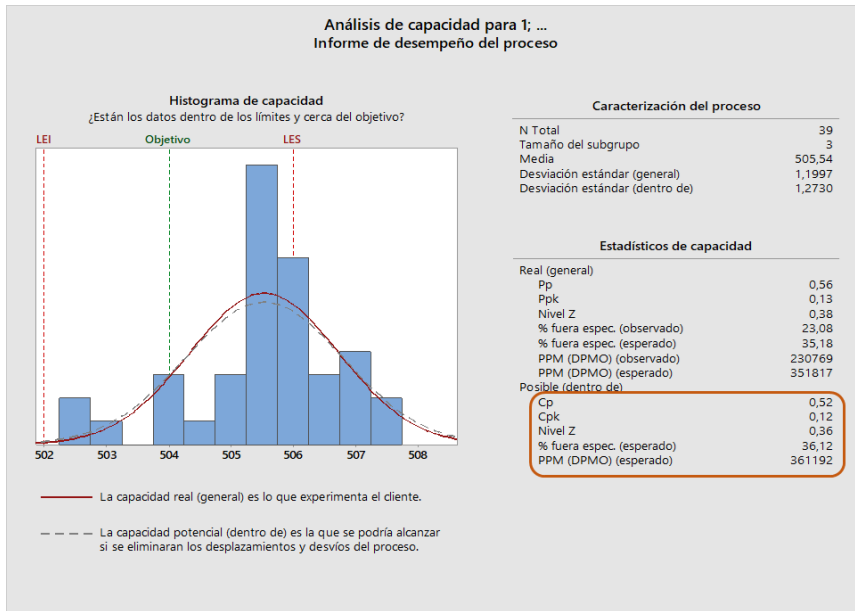
Fuente: elaboración propia mediante Software Minitab® 19, 2019.

En la figura 3 se presenta la carta de control de medias y rangos, y se obtiene como resultado que el proceso estaba bajo control estadístico, debido a que los datos registrados están en la región que contempla los límites de control superior e inferior, límites naturales de la variabilidad aleatoria. Se observó que el promedio del peso de la referencia presentó un gramo superior al objetivo de 504 gramos.

Respecto a la amplitud o rango se determinó que había una variabilidad de 0 a 5 gramos sobre la variación permitida por la empresa de 4 gramos. De ahí que la figura 3 permitió valorar el desempeño del proceso para definir las causas de variación y definir si la variabilidad era por causas comunes.

Teniendo como base la estabilidad del proceso se realizó un análisis de capacidad  $C_p$  y  $C_{pk}$ .

Figura 4. Análisis de capacidad



Fuente: elaboración propia mediante Software Minitab® 19, 2019.

Respecto a la figura 4, se encontró que la amplitud de la variación del proceso en relación con las especificaciones para el índice de capacidad  $C_p$  y  $C_{pk}$  fue de 0,52 y 0,12, respectivamente.

Para definir los resultados del cumplimiento de las especificaciones requeridas por la empresa, se evaluaron los valores obtenidos con los criterios e interpretación presentados en la tabla 2.

Tabla 2. Valores e interpretación del indicador

Valor $C_p$	Categoría del proceso	Decisión
$C_p \geq 2$	Clase mundial	Calidad Seis Sigma
$C_p \geq 1.33$	1	Adecuado
$1 < C_p < 1.33$	2	Parcialmente adecuado y requiere de un control estricto
$0.67 < C_p < 1$	3	No adecuado para el trabajo y es necesario un análisis del proceso
$C_p < 0.67$	4	Requiere de modificaciones muy serias

Fuente: [16].

Con esta información se determinó que el proceso no cumplía con las especificaciones, debido que los resultados en esta evaluación obtuvieron valores inferiores al tipo de clase de Seis Sigma. Es decir,  $C_p$  y  $C_{pk}$  del proceso son inferiores a los valores presentados en la tabla 2.

Este análisis también estimó los Defectos Por Millón de Oportunidades (DPMO), donde se concluye que, por cada millón de productos, 361.192 unidades están por fuera de las especificaciones.

*Analizar:* después de medir la variabilidad del proceso, en esta fase se decidió optar por un diseño factorial completo, con el objetivo de definir qué factores estaban influyendo significativamente en la variable de respuesta (peso).

Para determinar si los factores estaban afectando la variable de respuesta se planteó las hipótesis observadas en (1):

$$H_0 : \text{Valor } p \leq 0.05 \quad (1)$$

$$H_1 : \text{Valor } p > 0.05$$

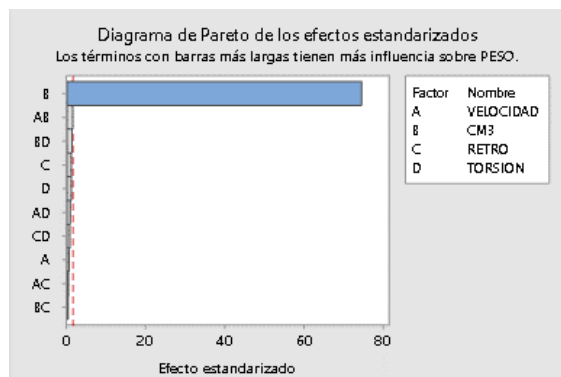
Interpretándose así:

Si el estadístico de prueba o valor del factor o interacción es menor e igual a 0,05, se define que hay una influencia significativa en la variable de respuesta; en caso contrario, no afecta la variable de respuesta.

Los resultados obtenidos del análisis ANOVA del diseño factorial indicaron que la variable de mayor magnitud era la porción de embutido o  $\text{cm}^3$  (estadístico de prueba 0.000).

La influencia en la respuesta del sistema ante cambios en las variables se puede observar en el diagrama de Pareto presentado en la figura 5. En el diagrama se confirma la relación  $\text{cm}^3$  presente en la variación, reflejando el predominio que tiene sobre la respuesta (peso). Las variables e interacciones que no sobrepasan el límite estadístico o línea roja no representan un aporte significativo.

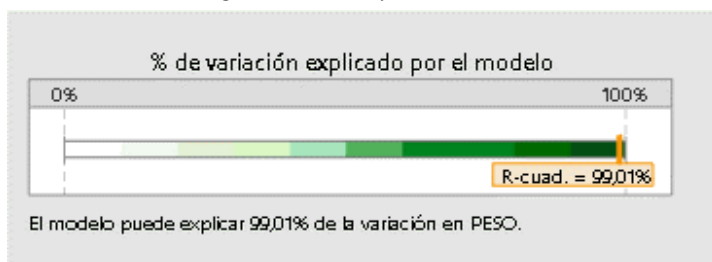
Figura 5. Diagrama de Pareto



Fuente: elaboración propia mediante Software Minitab® 19, 2019.

En la figura 6 se presenta el coeficiente de determinación (R-cuad), un estadístico para medir la calidad global del modelo; en otras palabras, cuantifica el porcentaje de variación total en la variable dependiente o de respuesta y que es explicado por el modelo [6]. De esta manera, un coeficiente de determinación mayor a 70 % es un modelo estadístico excelente [1, 4, 6]. Teniendo en cuenta lo anterior, el 99,01 % de la variación del peso en función de los factores definidos de la tabla 1, pueden ser explicados por el modelo estadístico.

Figura 6. Porcentaje de variación



Fuente: elaboración propia mediante Software Minitab® 19, 2019.

En la figura 7 se ilustran los efectos principales del diseño factorial. A medida que la pendiente sea mayor, es decir, entre más inclinada esté la línea entre el nivel bajo y alto, mayor magnitud o efecto tiene el factor sobre el peso [22].

Observando la inclinación de la pendiente en los factores se concluye que solo hay un efecto preponderante en la variable de respuesta de los cuatro factores con los que se trabajó. Siendo así, que el factor  $\text{cm}^3$  causa un efecto significativo en la variación del peso.

Figura 7. Efectos de los factores en el diseño factorial



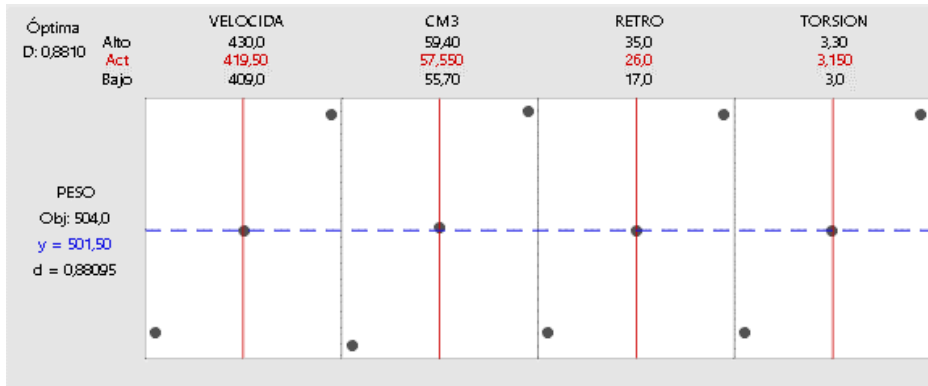
Fuente: elaboración propia mediante Software Minitab® 19, 2019.

Es importante aclarar que los efectos de las interacciones no se presentan, debido a que no representaron una influencia significativa en la variable de respuesta.

Una herramienta importante en el diseño factorial fue la utilización del optimizador de respuesta que ofrece el Software Minitab® 19, que identifica la configuración óptima posible de los niveles de cada factor para optimizar o alcanzar un objetivo.

En la figura 8 se observa la configuración que se obtiene de los niveles que podría alcanzar el valor objetivo de 504 gramos, observados en color rojo. Cabe destacar que el optimizador de respuesta obtiene un valor D o porcentaje de evaluación, el cual debe ser analizado. Este parámetro valora la manera en que la configuración de las combinaciones de los factores optimiza la respuesta.

Figura 8. Optimizador de respuesta



Fuente: elaboración propia mediante Software Minitab® 19, 2019.

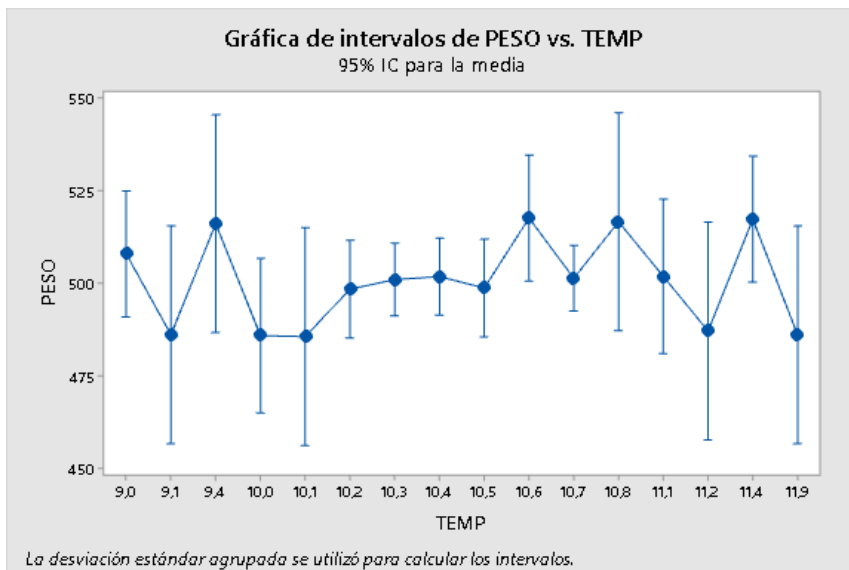
A partir de este resultado se obtuvo que hay una predicción del 88,01 % de alcanzar el valor objetivo con los niveles encontrados y aproximadamente un 12 % de incertidumbre de obtener resultados negativos.

Considerando que el proceso de embutido se encuentra en una zona donde se mantiene una temperatura baja, se consideró este factor para realizar un ANOVA y determinar si tenía algún efecto sobre el peso.

En los resultados del análisis ANOVA se encontró que no había una influencia significativa de la temperatura en el sobrepeso del producto, debido que su estadístico de prueba fue mayor a 0,05.

Además, con el objetivo de contrastar el resultado del ANOVA de un solo factor (peso vs. temperatura), en la figura 9 se muestra un gráfico de intervalos para evaluar si las medias de los pesos pueden ser significativas con el cambio de la temperatura. Para ello se revisa que los intervalos de confianza no se superpongan uno de otro [23]. Considerando lo anterior, se puede observar que los intervalos se superponen definiendo que las medias no son estadísticamente significativas y que la variable temperatura es insignificante.

Figura 9. Gráfico de intervalos, peso vs. temperatura



Fuente: elaboración propia mediante Software Minitab® 19, 2019.

*Mejorar:* esta fase tiene el objetivo de implementar posibles soluciones al problema, por lo que se realizó una prueba piloto con los niveles optimizados de la fase anterior y se analizó el comportamiento de las variables en la fase siguiente (controlar).

En la tabla 3 se presentan los valores que tomó cada factor para realizar la toma de datos.

**Tabla 3.** Factor y nivel óptimo

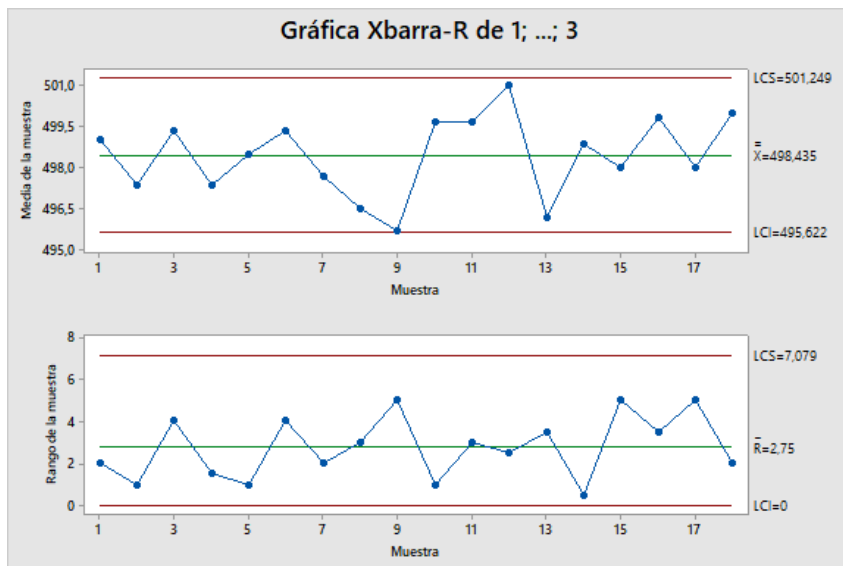
Factor	Unidades	Nivel
Velocidad	Unidades por minuto	419,5
cm <sup>3</sup>	Centímetros cúbicos [cm <sup>3</sup> ]	57,55
Retrosucción	Centímetros cúbicos [cm <sup>3</sup> ]	26
Torsión	Milímetros [mm]	3,15

Fuente: elaboración propia.

*Controlar:* con los datos recolectados se evaluaron los resultados esperados a través del gráfico de control X-R y análisis de capacidad.

Los resultados en la figura 10 indican que el proceso estaba bajo control estadístico, debido a que no presenta ninguna señal de patrones de tendencias, ciclos, demasiados puntos en una de las zonas o puntos por fuera de los límites.

Figura 10. Gráfico de control X-R



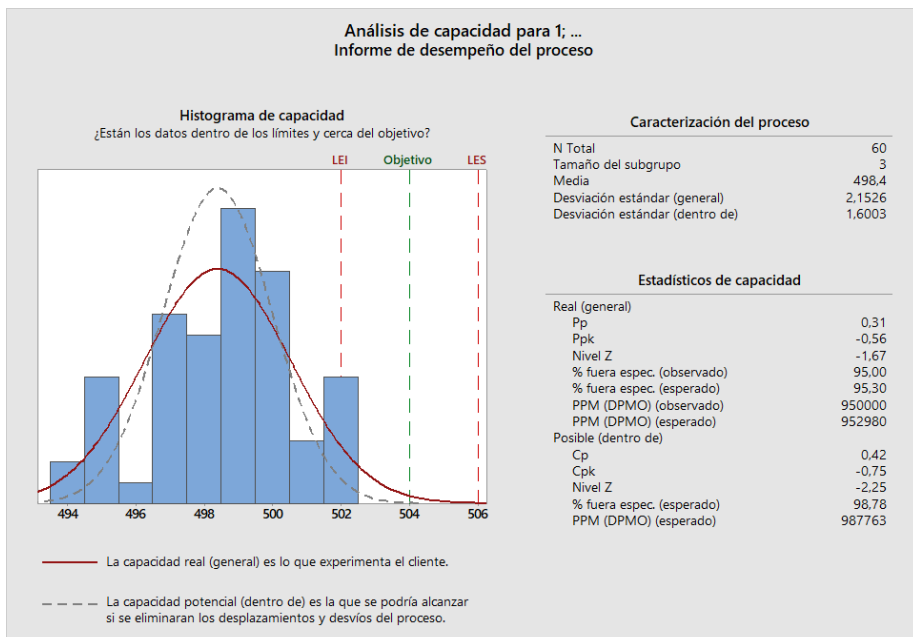
Fuente: elaboración propia mediante Software Minitab® 19, 2019.

Para evaluar si el proceso cumplió con las especificaciones se requiere que la variación real de los índices  $C_p$  y  $C_{pk}$  sea mayor a 1.33, como se describió en la tabla 2.

Por lo tanto, al analizar los valores obtenidos en los índices de capacidad  $C_p$  y  $C_{pk}$ , se concluye que no hay capacidad para cumplir los requerimientos del cliente o especificaciones.

Además, se observó que los datos recolectados están agrupados o tienden a la izquierda de la especificación inferior, reduciendo la variabilidad, pero sin capacidad de proceso; es decir, el embutido en ese momento estaba saliendo con bajo peso. Los resultados se soportan en el histograma presentado en la figura 11.

Figura 11. Análisis de capacidad



Fuente: elaboración propia mediante Software Minitab® 19, 2019.

### 3. CONCLUSIONES

La presente investigación demostró la importancia del uso adecuado del Control Estadístico de Procesos (SPC) y diseño de experimentos para controlar, monitorear y analizar procesos industriales con el fin de tomar decisiones.

Este estudio reflejó importantes criterios de evaluación, contrarios a los definidos previamente por la empresa de forma empírica. Es decir, la aplicación de este diseño de experimentos obtuvo resultados satisfactorios para la compañía, debido a la dificultad por parte de la empresa de adoptar la metodología para demostrar estadísticamente lo que sucedía con su proceso. Consideración que se contrasta con una investigación realizada por [17] en el cual menciona que el SPC es una técnica ampliamente conocida por su efectividad en el control de procesos, pero que muchas empresas de alimentos enfrentan dificultades para acoger este tipo de metodologías para evaluar sus procesos de producción.

Con los resultados del primer diagnóstico se logró identificar que el proceso de la referencia estudiada estaba bajo control estadístico y que reflejaba un rango de variación no permitido. Además, reveló la necesidad de realizar estudios que reflejen la variación o el sobrepeso del producto.

A raíz de la variación que presentaba el proceso se realizó el diseño de experimentos con el objetivo de determinar las variables influyentes en el sobrepeso, de tal manera que se obtuvo estadísticamente que la variable que influía significativamente en el peso del producto era el factor  $\text{cm}^3$  o la porción de llenado.

La efectividad del diseño de experimentos demostró con estadísticas que únicamente había una variable que ejercía alta variación, contrario a las premisas de la empresa, donde se pensaba que todas las variables que se modificaban en el proceso de embutido realizaban una desviación en el peso. También se probó que la variable temperatura sobre el peso no influía significativamente.

Se comprobó que la aplicación de los diseños factoriales completos son una estrategia experimental óptima para estudiar simultáneamente el efecto de varios factores sobre la variable de respuesta y sus interacciones.

En cuanto a la optimización de recursos, se debe considerar que la desventaja del diseño factorial completo, cuando existen cinco o más factores, consiste en el tamaño o magnitud de corridas que se generan.

Finalmente, como posibilidad de mejora, se sugiere realizar más réplicas del diseño de experimentos que suministren mucha más información para analizar los datos obtenidos y crear más confiabilidad en la toma de decisiones.

## REFERENCIAS

- [1] D. C. Montgomery y G. C. Runger, *Probabilidad y estadística aplicadas a la ingeniería*, Mexico: Limusa Wiley, 2015.
- [2] A. Luceño y F. J. González, *Métodos estadísticos para medir, describir y controlar la variabilidad*, Santander, España: Universidad Cantabria, 2015.
- [3] D. C. Montgomery, *Diseño y análisis de experimentos*, Segunda Edición ed., México: Limusa Wiley, 2004.
- [4] A. N. E. Heriberto, R. L. A. Javier, V. L. J. Antonio y P. G. Russell, “Comparative Study Between the Two Experimental Design Approaches Taguchi and Traditional in Presence of Control by Control Interactions”, *ScienceDirect*, vol. 16, nº. 1, pp. 131-142, 2015. Doi: 10.1016/S1405-7743(15)72114-1
- [5] S. A. H. Lima, J. Antony y S. Albliwi, “Statistical Process Control (SPC) in the food industry – A systematic review and future research agenda”, *ScienceDirect*, vol. 37, nº. 2, pp. 137-151, 2014. DOI: 10.1016/j.tifs.2014.03.010
- [6] H. Gutiérrez Pulido y R. De la Vara Salazar, *Análisis y diseño de experimentos*, Mexico: McGraw-Hill, 2012.

- [7] J. D. Castro, “Métodos estadísticos para el control y la mejora continua en el proceso de tratamiento térmico de la aleación de aluminio AA2024”, [En línea], Disponible: <https://ria.utn.edu.ar/items/0c12fd1c-8b6d-43f1-a1c7-83f8dc467410>
- [8] R. Lopes *et al.*, “Reducing scrap and improving an air conditioning pipe production line”, *Procedia Manuf.*, vol. 51, pp. 1410–1415, 2020. Accedido el 1 de julio de 2025. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.10.196>
- [9] Adamastor R. Tôrres, Antônio Diógenes P. de Oliveira, Severino Grangeiro, Wallace D. Fragoso, *Journal of Process Control*, vol. 69, pp. 97-102, 2018. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jprocont.2018.06.001>
- [10] E. J. Escalante Vázquez, *Diseño y análisis de experimentos*, México: Limusa, 2014.
- [11] D. C. Montgomery, *Design and analysis of Experiments*, Arizona State University: John Wiley & Sons, Inc., 2013.
- [12] R. O. Kuehl, *Diseño de experimentos: principios estadísticos para el diseño y análisis de investigaciones*, Mexico: Thomson Learning, 2001.
- [13] D. C. Fettermann, A. M. Olivera, G. L. Tortorella, G. A. Zandonai y M. E. Soares, “Improvements in the processing of agricultural commodities: The case of cocoa liquor”, *Dyna*, vol. 84, n°. 201, pp. 117-122, 2017. Doi: 10.15446/dyna.v84n201.56672
- [14] B. Barbosa, M. T. Pereira, F. J G Silva, R. D S G Campilho, *Procedia Manufacturing*, vol. 11, pp.1239-1246, 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.250>
- [15] A. Ruiz y F. Rojas, *Control estadístico de procesos*, Madrid: Universidad Pontificia Comillas, 2006.
- [16] H. Gutiérrez Pulido y R. de la Vara Salazar, *Control estadístico de la calidad y seis sigma*, Mexico: McGraw-Hill, 2013.
- [17] S. A. Halim Lim, J. Antony, *Trends in Food Science & Technology*, vol. 58, pp.133-139, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tifs.2016.10.025>
- [18] D. Montgomery, *Control estadístico de la calidad*, Mexico: Limusa-Wiley, 2004.
- [19] C. Werkema, *Ferramentas Estatísticas Básicas do Lean Seis Sigma Integradas: PDCA e DMAIC*, Brasil: El Sevier, 2016.
- [20] L. Socconini, *Certificación Lean Six Sigma Green Belt para la excelencia en los negocios*, Marge Books., 2015.
- [21] M. Smętkowska, B. Mrugalska, *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, vol. 238, pp. 590-596, 2018. <http://dx.doi.org/10.1016/j.sbspro.2018.04.039>
- [22] J. D. Muñoz Sierra, D. A. Camargo Trillos y S. D. Gallego, “Aplicación de la metodología de superficie de respuesta en un proceso de absorción del CO2 de un biogás en una solución

alcalina”. *Dyna*, vol. 76, n°. 159, pp. 135-144, [Fecha de consulta: 1 de julio de 2025]. ISSN: 0012-7353. Disponible: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=49611945015>

- [23] Minitab 19, “<https://support.minitab.com>”, Soporte de Minitab 19, 2019. [En línea]. Disponible: <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/19/help-and-how-to/graphs/interval-plot/interpret-the-results/key-results/>.



Open Access: This article is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License, which allows non-commercial use, distribution, and reproduction with proper credit to the author and source, without modifications. Third-party material is included under the same license unless otherwise stated. For uses beyond this license, permission must be obtained from the copyright holder.

© The Author(s) 2025 - <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>