

Curvas de operación de métricas Seis Sigma para evaluar la calidad de un proceso de producción paralelo convergente

Operation curves of Six Sigma metrics to evaluate the quality of a convergent parallel production process

Tomás José Fontalvo Herrera^{(1)*}, Kendry García⁽²⁾, Ana Gabriela Banquez Maturana⁽³⁾

(1) * PhD en Administración, Universidad de Cartagena, Director del Grupo de Investigación Calidad y Productividad Organizacional, Cartagena, Colombia.

tfontalvoh@unicartagena.edu.co

(2) Administradora Industrial, Universidad de Cartagena, Investigadora del Grupo de Investigación Calidad y Productividad Organizacional, Cartagena, Colombia.

(3) Administradora Industrial, Universidad de Cartagena, Investigadora del Grupo de Investigación Calidad y Productividad Organizacional, Cartagena, Colombia.

Cite this article as: Tomás José Fontalvo Herrera, Kendry García, Ana Gabriela Banquez Maturana, “Curvas de operación de métricas Seis Sigma para evaluar la calidad de un proceso de producción paralelo convergente”, *Prospectiva*, Vol. 23 N° 1 2025

Recibido: 29/10/2023 / Aceptado: 19/12/2024

<http://doi.org/10.15665/rp.v23i1.3380>

RESUMEN

El objetivo de esta investigación es evaluar la calidad de un proceso de producción paralelo convergente, a través de las curvas operacionales generadas por las métricas Six Sigma. Como concepción teórica, se articularon los conceptos de sistemas de evaluación de calidad de un sistema de producción, métricas Seis Sigma, sistema de producción paralelo convergente y curvas de operación. Como metodología, se realizó una investigación básica, cuantitativa y empírica, que permitió evaluar el proceso propuesto a través de las nuevas curvas de operación generadas por las métricas Seis Sigmas. Como hallazgo, se puede evidenciar que, el mejor nivel del sistema de producción sigma (Z) de 5.30, logra que la tasa de defectos por millón de oportunidades (DPMO) se reduzca significativamente de 9892 a 68, permitiendo que el rendimiento aumente de 99% a 100%. Esto demuestra que las curvas operativas de las métricas Seis Sigmas son una herramienta confiable para analizar la variabilidad de los procesos, lo que ayuda a mejorar la calidad y la eficiencia de los sistemas de producción.

Palabras claves: *Seis Sigma, proceso de producción, calidad, rendimiento, curvas de operación.*

ABSTRACT

The objective of this research is to evaluate the quality of a convergent parallel production process, through the operational curves generated by Six Sigma metrics. As a theoretical conception, the concepts of quality evaluation systems of a production system, Six Sigma metrics, parallel production system and operational curves were articulated. As a methodology, basic, quantitative and empirical research was carried out, which allowed the evaluation of the proposed process through the new operation curves generated by the Six Sigma metrics. As a finding, it can be evidenced that, the best level of the sigma production system (Z) of 5.30, achieves that the rate of defects per million opportunities (DPMO) is significantly reduced from 9892 to 68, allowing the yield to increase from 99% to 100%. This demonstrates that Six Sigma metric operating curves are a reliable tool for analysing process variability, which helps to improve the quality and efficiency of production systems.

Keywords: *Six Sigma, production process, quality, performance, operating curves.*

1. INTRODUCCIÓN

La competitividad es la capacidad de generar la mayor satisfacción del consumidor al menor precio, es decir, con la producción al menor costo posible y en la actualidad la creciente demanda de los consumidores de productos de alta calidad y precios han aumentado la presión sobre las organizaciones, por lo tanto, las empresas deben aplicar estrategias eficaces para mejorar continuamente sus procesos y productos. Dicho esto, una de las muchas estrategias son las métricas Seis Sigma, consideradas una de las herramientas más populares para la mejora de procesos [1]. Cabe resaltar que, a través del uso intensivo de la estadística y la resolución de problemas, Seis Sigma permite a las empresas identificar y analizar los problemas de forma sistemática, lo que les facilita tomar decisiones basadas en datos y hechos, mejorando así su rendimiento en el mercado. Hay que tener en cuenta que Seis Sigma es una poderosa herramienta para la reducción de costes, la mejora de la calidad, la satisfacción del cliente y la competitividad [2]. Esta metodología se compone de 5 fases, que son: definir, medir, analizar, mejorar y controlar [3], y representa el número total de desviaciones estándar resultantes de los procesos [4]. Su objetivo es mejorar la calidad aumentando la capacidad de los procesos, de forma que se genere el menor número de defectos por millón de oportunidades [5, 6], puesto que, estos defectos deben ser mínimos y poco visibles para los clientes. Algunos autores como [7] definen Seis Sigma como una metodología de mejora de procesos centrada en el cliente dándole exactamente lo que quiere y necesita, a buen precio y justo a tiempo. Del mismo modo, los autores [8, 9] describen que la metodología Seis Sigma es una herramienta que agrupa varios métodos de gestión de la calidad y control estadístico que, combinados con la medición del rendimiento de los procesos, pueden centrarse en mejoras específicas o en la organización en su conjunto, con lo que se puede lograr la reducción de los costes generados por la no calidad y aumentar la rentabilidad. Del mismo modo, la metodología Seis Sigma se utiliza ampliamente en diversas industrias para mejorar la calidad, la productividad y la satisfacción del cliente [10].

Esta metodología se ha convertido en una optimización de procesos de negocio eficientes y en una de las estrategias más importantes para las empresas [4]. Diferentes investigaciones recientes han abordado el estudio de Seis Sigma y la articulación de otras técnicas de control estadístico utilizando métodos estructurados de una y dos fases, sin embargo, no se evidencia el uso estructurado de un método de tres fases que articule el control estadístico multivariado [9, 10, 11]. Dentro de las herramientas implementadas por otros autores se encuentran el análisis multidimensional y las modificaciones de la figura de control para evaluar las dimensiones de calidad, además la utilización de la inteligencia artificial y el clustering para evaluar la calidad de un servicio [4, 5, 7]. Como motivación para esta investigación se puede señalar que, a pesar de las investigaciones presentadas con el uso de métricas Seis Sigma, no existe evidencia en la literatura del uso de curvas de operación de métricas Seis Sigma, que permitan evaluar la capacidad del nivel de desempeño de la calidad en términos de defectos, de un sistema productivo o sus procesos en condiciones cambiantes, que contribuyan a la toma de decisiones oportunas, de acuerdo a las condiciones de operación del contexto evaluado para mejorar la calidad. De igual manera como motivación esta investigación a diferencia de otras plantea el diseño de un sistema de control estadístico integral que permite analizar el desempeño del nivel sigma del sistema de operación de forma global y sus efectos de manera específica en los procesos del sistema a través de un análisis de sensibilidad en condiciones variables de operación. Que permite identificar las mejores y peores condiciones de operación de control estadístico de la calidad del sistema productivo analizado. Así mismo propone las curvas de operación de las métricas seis sigma con lo que se estudian el desempeño del sistema y sus procesos en el rango de operación de las métricas seis sigma Z, Rendimiento Y y Defectos en partes por millón DPMO. Con base en lo anterior, esta investigación plantea las siguientes interrogantes: ¿Cómo evaluar el desempeño y la integridad de los sistemas de manufactura mixta concurrente con métricas Seis Sigma? ¿Cómo determinar el número mínimo de defectos para alcanzar el nivel sigma más elevado para el proceso? ¿Cómo se construye una curva de operación de métricas seis sigma para un proceso y un sistema de fabricación mixta concurrente? Para responder a las preguntas de investigación anteriormente planteadas, se han establecido los siguientes objetivos: i) Evaluar el desempeño y la integridad de los sistemas de manufactura mixta

concurrente con métricas Seis Sigma, ii) Determinar el número mínimo de defectos para alcanzar el mayor nivel sigma del proceso y el sistema productivo iii) Construir la curva de operación de métricas seis sigma del proceso y del sistema productivo. Esta investigación analiza las diferentes curvas de operación de las métricas Seis Sigma para evaluar el sistema en estudio, así como su uso en mediciones de calidad de sistemas paralelo concurrente utilizando una visión de mejora continua con enfoque en la reducción de la variabilidad del proceso como lo señalan otras investigaciones[12].

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Sistemas de evaluación de la calidad de un sistema de producción.

Seis Sigma es una metodología de mejora continua que se centra en la eliminación de defectos y la reducción de la variabilidad en los procesos de producción y servicios mediante el uso de herramientas estadísticas y de gestión [8]. El poder de Seis Sigma reside en la "Escala Sigma" utilizada para medir el rendimiento de los procesos [5, 7]. Esta escala suele oscilar entre 0 y 6 y está correlacionada con características como defectos por unidad, piezas por millón de defectos y probabilidad de fallo [8]. Su principal objetivo es aumentar el nivel Sigma hasta alcanzar una calidad de producto o servicio que no genere más de 3,4 defectos por millón de oportunidades (DPMO), lo que se traduce en un alto índice de calidad del 99,9999% [6]. Por lo tanto, su medición es esencial para el análisis y la toma de decisiones en los sistemas de producción [13]. Una de las ventajas de Seis Sigma es que permite a las organizaciones centrarse en la mejora de los procesos críticos que tienen un impacto directo en la satisfacción del cliente y en la rentabilidad del negocio [14]. Además, la metodología Seis Sigma se ha adaptado a diversos sectores y procesos, como la fabricación, los servicios, la sanidad y las finanzas. Para [15] se ha demostrado que la implantación de Seis Sigma en las organizaciones de servicios mejora la calidad, aumenta la satisfacción del cliente y reduce los costes operativos; también puede ayudar a las organizaciones de servicios a ser más eficaces y eficientes en la asignación de recursos y en la identificación y eliminación de procesos innecesarios. Por otro lado, [16] consideran que Seis Sigma también puede ayudar a las organizaciones a ser más innovadoras y competitivas en el mercado.

2.2 Métricas Seis Sigma para evaluar un sistema de producción.

La métrica Seis Sigma se ha posicionado como una estrategia de mejora de los procesos empresariales que ha llegado a todo tipo de empresas industriales y comerciales, incluidas las pequeñas y medianas empresas, y, en consecuencia, a sus procesos [17]. Existen varias métricas Seis Sigma que pueden utilizarse para evaluar un sistema de producción, como los defectos por millón de oportunidades, el ciclo de tiempo del proceso, el índice de capacidad del proceso y el valor añadido [4]. Estas métricas pueden ayudar a identificar áreas de mejora y maximizar la eficiencia y la calidad del sistema de producción. Ahora bien, investigaciones como, la evaluación de un análisis global del servicio en el centro de atención al cliente, permitieron estudiar y comprender la dinámica de todo el sistema para, posteriormente, medir el rendimiento de la dimensión de calidad del servicio utilizando Seis Sigma [7]. De acuerdo con [14, 18] Seis Sigma es un enfoque basado en datos y estadísticas que busca reducir la variación en los procesos y mejorar la calidad de los productos y servicios y su implementación exitosa en las organizaciones requiere de un fuerte compromiso y liderazgo, una cultura de mejora continua, una correcta selección de proyectos y una adecuada capacitación del personal. Por otro lado, los autores [4, 19] consideran que la métrica Seis Sigma resulta ser una herramienta muy eficaz para medir el desempeño de los procesos de producción y servicios, ya que tiene la capacidad de convertir información cualitativa en datos cuantitativos precisos, facilitando su análisis y proporcionando una perspectiva concreta del desempeño de todas las dimensiones de calidad involucradas en los procesos, permitiendo establecer.

2.3 Sistema de producción en paralelo

Un sistema de producción paralelo se refiere a un conjunto de procesos productivos alternativos que se desarrollan simultáneamente, este sistema productivo puede mejorar la capacidad de respuesta de la empresa

ante situaciones de incertidumbre y cambios en la demanda del mercado [20]. En un estudio realizado por [21], se encontró que el uso de un sistema de producción paralelo puede mejorar la eficiencia y la flexibilidad en la producción, especialmente en situaciones de alta variabilidad de la demanda. Los autores destacan que la implementación de un sistema de producción en paralelo debe planificarse cuidadosamente para maximizar los beneficios y minimizar los costes adicionales asociados. Cabe señalar que la producción paralela consiste en varias líneas de producción que aumentan la eficiencia del proceso mediante el uso de recursos compartidos [22]. Cabe señalar que existe un enfoque común y práctico para conectar estas líneas de trabajo paralelas con el fin de eliminar los cuellos de botella y equilibrar la cadena de montaje [20]. Del mismo modo, [23] estudiaron la implementación de un sistema de producción en paralelo en una empresa de fabricación y descubrieron que esta estrategia puede ayudar a mejorar y reducir los tiempos de espera en la producción. Por otro lado, los autores [21], señalan que el sistema de producción paralela multilínea es una estrategia de fabricación muy útil para crear múltiples líneas de producción paralelas independientes que permiten fabricar diferentes productos simultáneamente. Este enfoque es adecuado para las empresas que fabrican múltiples productos y desean aumentar la eficiencia y la flexibilidad de sus procesos de producción.

2.4 Curvas de operación

En el contexto de Seis Sigma, la curva de operación es una herramienta que puede mejorar la calidad y la eficacia de los procesos de producción y servicios. Las curvas de operación permiten a los equipos de Seis Sigma comprender cómo está funcionando un proceso y cómo puede mejorarse determinando los valores óptimos de los parámetros de entrada que maximizan el rendimiento del proceso. En un estudio realizado por [13] utilizaron la metodología Seis Sigma y las curvas de operación para mejorar la capacidad de los procesos de fabricación de sistemas microelectromecánicos, donde dichas curvas se utilizaron para analizar cómo los parámetros del proceso afectan a la calidad de las piezas y determinar los valores óptimos de los parámetros del proceso para maximizar la calidad de las piezas. Por otro lado, los autores [24], afirman que las curvas operativas resultantes de las métricas sigma son fundamentales para evaluar a priori la sensibilidad del proceso o el cambio de su variabilidad durante un tiempo determinado. En coherencia con lo anterior, los investigadores [6] observaron el comportamiento del desempeño de las operaciones del sistema de distribución individual de mercancías en el sector logístico evaluado por las métricas Seis Sigma en condiciones variables en múltiples periodos y los indicadores multivariantes de capacidad, con la que se evaluó la calidad en dicho contexto. Se observó la pertinencia de analizar las curvas Z Vs DDPMO, Z Vs Y y Z Vs n. De lo anterior se puede analizar que valorar las métricas de Seis Sigma en condiciones variables como se señala en las curvas de operación de las métricas Seis Sigma propuestas en esta investigación en las Figuras 1, 2 y 3, se constituye una herramienta novedosa para evaluar las capacidades y condiciones de operación de un proceso o un sistema.

Figura 1. Curva de operación nivel sigma vs DPMO.

Figure 1. Operation curve sigma level vs DPMO.

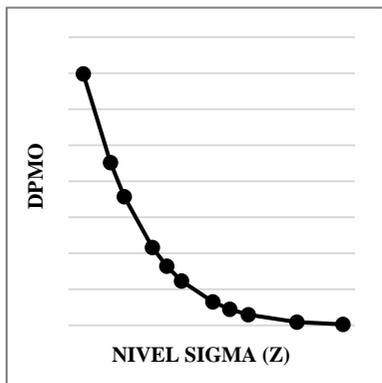


Figura 2. Curva de operación nivel sigma vs rendimiento.

Figure 2. Operation curve sigma level vs performance

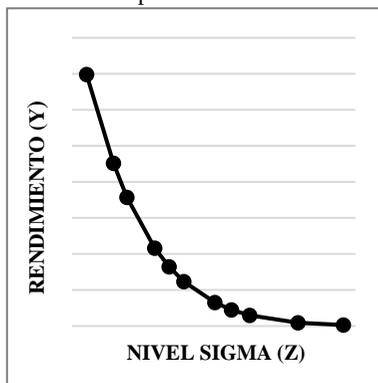
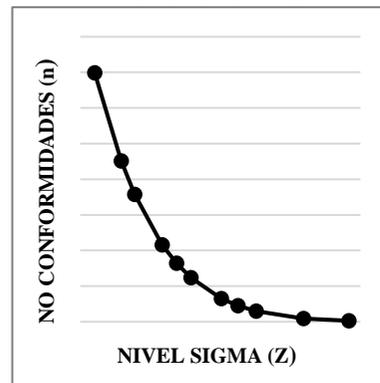


Figura 3. Curva de operación nivel sigma vs no conformidades.

Figure 3. Operation curve sigma level vs nonconformities.



3. METODOLOGÍA

Esta investigación se aborda con un enfoque cuantitativo desde un tipo de Investigación básica. Estructurando el modelo de control de calidad del sistema de producción paralelo convergente por medio de un análisis lógico propositivo, para establecer las curvas de operación objeto de esta investigación, con base en el control estadístico de la calidad, las métricas seis sigma y las matemáticas. Para evaluar el desempeño de la calidad del sistema objeto de esta investigación se realizó un análisis de sensibilidad con el fin de generar los datos del sistema propuesto a partir de las variables de entrada, salida y las métricas de seis sigma del sistema de control estadístico planteado en el rango de operación de las condiciones de operación del sistema productivo estudiado. Lo cual requirió que se analizará el desempeño de la calidad a través del nivel sigma global evaluado entre 3 (menor desempeño) y 5,3 (mayor desempeño) de acuerdo a la métricas seis sigma Z y en función de esto analizar el desempeño de la calidad del sistema global y de los procesos del sistema de producción paralelo convergente, a través de las curvas operacionales de las métricas Seis Sigma.

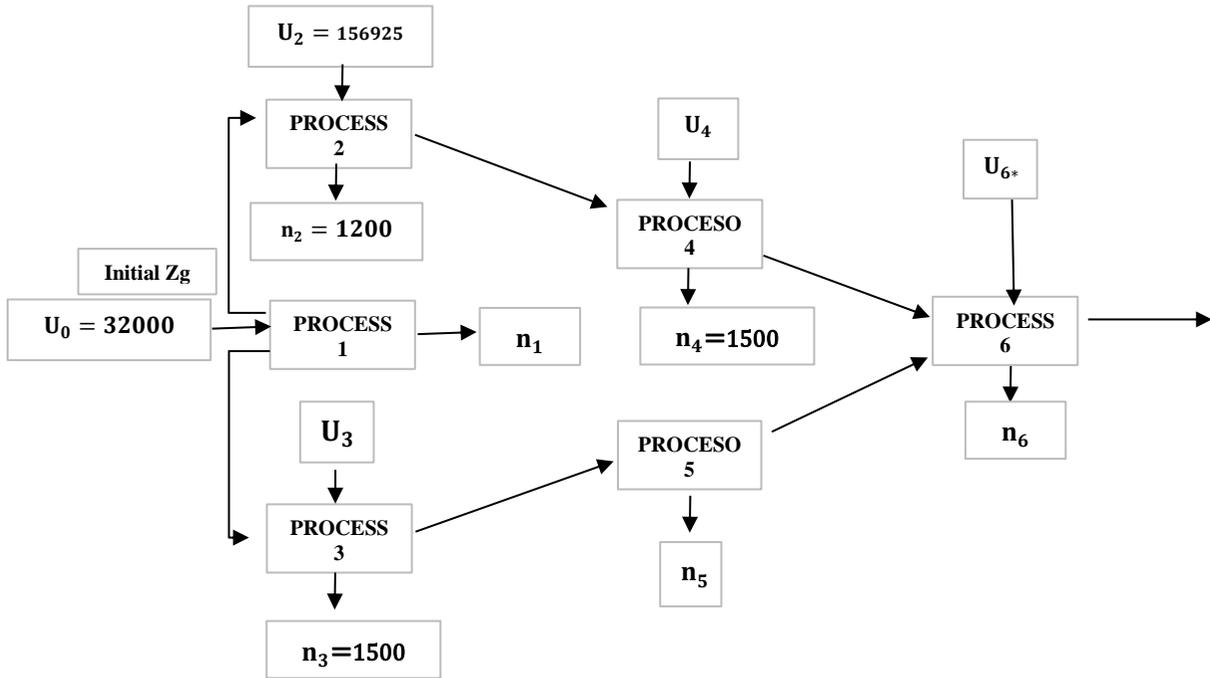
Para ello, se implementaron los siguientes pasos: 1) Levantamiento de la estructura del sistema de control estadístico de la calidad para el sistema en paralelo convergente; 2) Establecimiento de las condiciones de operación del sistema a evaluar; 3) Identificación de la cuantificación de las variables de entradas y salida de las operaciones del sistema; 4) Valoración del sistema y de los procesos de forma global e independientes con las métricas; 5) Elaboración de las curvas de operación de las métricas Seis Sigma (Z); 6) Evaluación del desempeño del sistema de control estadístico de la calidad para el sistema en paralelo convergente a través de las métricas Seis Sigmas; 7) Especificación de las capacidades máximas y mínimas de desempeño de las métricas de Seis Sigma del sistema global y por procesos; y 8) Análisis de las capacidades máximas y mínimas del sistema de control estadístico de la calidad para el sistema. Cabe agregar que la metodología propuesta, contempla la aplicación de las métricas Seis Sigmas definida en la tabla 1.

Tabla 1. Métricas Seis Sigma utilizadas.
Table 1. Six Sigma Metrics Used.

Métricas	Definición
DPMO	Número de defectos por millón de oportunidades
U	Número de unidades críticas revisadas
O	Oportunidad de error por unidad
Z	Nivel de desempeño de calidad sigma
n	Número de unidades inconformes
Y	Rendimiento del proceso

El sistema propuesto consta de seis procesos, con un nivel sigma inicial de 3,1 (Z) (Figura 4). Además, se procesa las entradas para cada proceso con diferencias en la distribución de cada uno. En el proceso 1 no cuenta con el número de unidades defectuosas (n). Las condiciones de operación del sistema de control estadístico de la calidad para todos los subprocesos analizados se presentan en la Figura 4.

Figura 4. Esquema del sistema de producción
Figure 4. Diagram of the production system



Para el desarrollo de la investigación fue necesario conocer primero la cantidad de productos defectuosos por millón de oportunidades (DPMO) que arroja el sistema en general, a través de la ecuación 1 presentada en las métricas Seis Sigma establecidas por Chen et al. (2003) citado por Fontalvo y Banquez (2023).

$$DPMO = e^{\left[\frac{29,37 - (z - 0,8406)^2}{2,221} \right]} \quad (1)$$

Tras calcular DPMO, se procede a hallar los defectos globales (nG), mediante la ecuación 2.

$$n_G = \frac{DPMO (U*O)}{1.000.000} \quad (2)$$

Después de obtener la cantidad total de productos defectuosos (nG) que se generan en el sistema. A partir de este valor y teniendo en cuenta la relación entre los procesos presentados en la ecuación 3, se calculan los defectos por proceso utilizando un balance global de defectos.

$$n_g n_1 n_5 n_6 n_g = n_1 + n_2 + n_3 + n_4 + n_5 + n_6 \quad (3)$$

El balance general de defectos de todo el sistema del control estadístico de la calidad se presenta a continuación (ecuación 4):

$$n_g = n_6 + n_2 + n_3 + n_4 + \frac{1}{4} n_6 + n_6 \quad (4)$$

Después de determinar el número de unidades defectuosas que se generaron en los procesos 1, 5 y 6, fue posible obtener el número de unidades que entran y salen en los demás procesos, para lo cual fue necesario realizar los balance globales y específicos por proceso para establecer unidades de entrada, defectos generados y salidas. También determinamos las cantidades de DPMO que se generan en cada proceso, utilizando la ecuación 5:

$$DPMO = \frac{n}{U*O} * 1.000.000 \quad (5)$$

Así como, su nivel sigma, con la ecuación 6.

$$Z = 0,8406 + \sqrt{29,37 - 2,221 * \ln(DPMO)} \quad (6)$$

Después de calcular todas las métricas mencionadas anteriormente, se halló el rendimiento de cada proceso y del sistema en general, con la ecuación 7.

$$Y = 1 - \left(\frac{n}{U}\right) U_S \quad (7)$$

Todo el proceso mencionado se repitió con diferentes niveles sigma para comparar el rendimiento de cada uno en el sistema. Para ello, la información se manejó aleatoriamente en una escala sigma, en el rango permitido del modelo. Para evaluar el rendimiento se tuvo en cuenta los criterios establecidos en la Tabla 2.

Tabla 2. Criterios de rendimiento del sistema.

Table 2. Performance criteria for the system.

Nivel de rendimiento	Nivel sigma (Z)	Rendimiento(Y)
Deficient	Less than 3	Less than 95%
Well	$3 \leq Z \leq 4,5$	$95\% \leq Y \leq 97,5\%$
Excellent	$Z > 4,5$	$Y > 97,5\%$

4. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

A continuación, se exhiben las curvas de operación del sistema productivo, tanto en el contexto de sus procesos individuales como en el de su conjunto global, generadas a través del análisis de métricas aplicadas en diversas etapas de sigma para ambos sistemas.

Global Process

Tabla 3. Resultado global del sistema

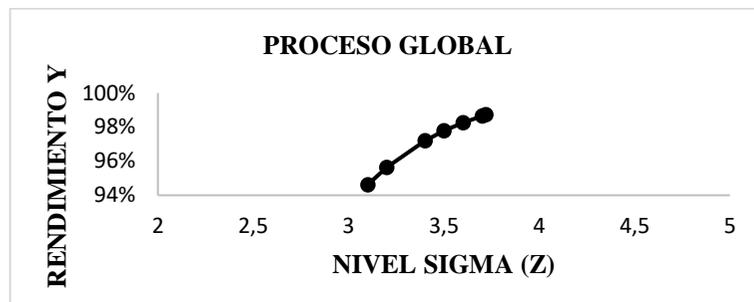
Table 3. Overall system result

Proceso global				
U_g	DPMO	n_g	Z_g	Y_g
335000	53841	18036	3,1	95%
335000	43731	14650	3,2	96%
335000	28082	9407	3,4	97%
335000	22201	7437	3,5	98%
335000	17395	5827	3,6	98%
335000	13506	4524	3,7	99%
335000	12826	4296	3,72	99%

Luego de analizar la Tabla 3 del proceso global del sistema de producción, se puede observar que para el nivel sigma (Z) más bajo de 3,1, el desempeño (Y) fue bueno, ya que se ubicó en 95%, aun así, el número de no conformidades (n), fue bastante alto estando en 18036, lo que evidencia la necesidad de mejora del proceso. Así mismo, se muestra que la variación del nivel sigma (Z) en el proceso no fue muy significativa, ya que pasó de 3.1 a 3.72, con todo y eso, el cambio en el desempeño fue notorio ya que osciló de 95% a

99%, mientras que el número de no conformidades pasó de 18036 a 4296 y los defectos en parte por millón de oportunidades, tuvo un cambio bastante alto al pasar de 53841 a 12826, con una diferencia de 41015.

Figura 6. Curva de operación al proceso global (Z) vs (Y)
Figure 6. Operation curve to the global process (Z) vs (Y)



La Figura 6 muestra la tendencia de las métricas globales Seis Sigma del sistema en paralelo, en la que se observa que a medida que el nivel sigma (Z) aumenta de 3,1 a 3,72, el rendimiento (Y) aumenta significativamente del 95% al 99%. Esto demuestra la importancia de la curva operativa para la toma de decisiones y la gestión global de un sistema de producción.

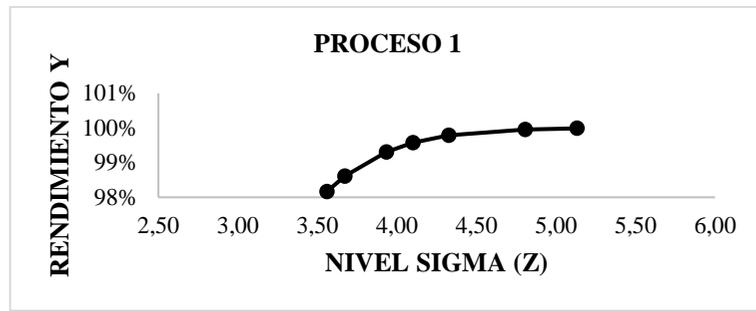
Proceso 1

Tabla 4. Resultado de las métricas Seis Sigma aplicadas al proceso 1.
Table 4. Result of the Six Sigma metrics applied to process 1.

Proceso 1				
U_1	DPMO1	n_1	Z_1	Y_1
320000	19218	6149	3,56	98%
320000	14514	4644	3,67	99%
320000	7233	2314	3,93	99%
320000	4497	1438	4,10	100%
320000	2260	723	4,33	100%
320000	451	144	4,81	100%
320000	135	43	5,13	100%

Como se puede observar en la Tabla 4 y en la Figura 7, cuando el nivel sigma (Z) aumenta de 3,56 a 5,13, el número de no conformidades (n) disminuye considerablemente de 6149 a 43, consiguiendo que el rendimiento (Y) aumente significativamente del 98% al 100%. Asimismo, se puede observar en la Tabla 4 que para el menor rendimiento del nivel de calidad sigma (Z) igual a 3,56, se generan 19218 defectos por millón de oportunidades, hecho que reduce el rendimiento al 98%. Lo anterior evidencia la relevancia de las curvas de operación generadas por las métricas Seis Sigma en la evaluación de sistemas de producción.

Figura 7. Curva de funcionamiento del proceso 1 (Z) frente a (Y)
Figure 7. Operation curve to process 1 (Z) vs (Y)



De la Figura 7 se deduce que el rendimiento del proceso 1 del sistema fue bastante bueno, ya que se situó entre el 98% y el 100%, con niveles sigma que oscilaron entre 3,56 y 5,13.

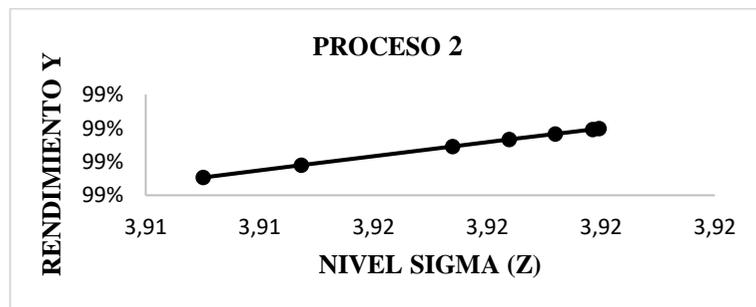
Proceso 2

Tabla 5. Resultado de las métricas Seis Sigma aplicadas al proceso 2
Table 5. Result of the Six Sigma metrics applied to process 2

Proceso 2				
U_2	DPMO	n_2	Z_2	Y
156925	7647	1200	3,91	99%
165178	7610	1200	3,91	99%
166343	7555	1200	3,92	99%
166781	7534	1200	3,92	99%
167138	7517	1200	3,92	99%
167428	7503	1200	3,92	99%
167478	7501	1200	3,92	99%

Al estudiar la tendencia de las métricas sigma del proceso 2 (Tabla 5), se observa que no tuvo mucha variación, ya que su número de no conformidades (n) se mantuvo en 1200, el nivel sigma (Z) pasó de 3,1 a 3,92, el rendimiento (Y) fue el mismo de 99% y los defectos en partes por millón de oportunidades (DPMO) oscilaron entre 7647 y 7501.

Figura 8. Curva de funcionamiento del proceso 2 (Z) frente a (Y)
Figure 8. Operation curve to process 2 (Z) vs (Y)



Observando la Figura 8, que representa la relación entre la curva de operación Z y el rendimiento, se puede apreciar que el peor rendimiento del proceso se presenta con un nivel de calidad sigma Z de 3. 91, lo que

conlleva a un rendimiento del 99% del proceso. Mientras que, el mejor desempeño, tiene un nivel de calidad sigma Z de 3.92, con un rendimiento igual al anterior, mostrando la poca variabilidad que se presentó en el proceso 2.

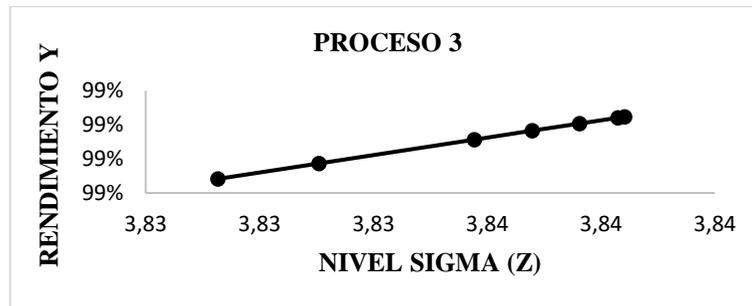
Proceso 3

Tabla 6. Resultado de las métricas Seis Sigma aplicadas al proceso 3
Table 6. Result of the Six Sigma metrics applied to process 3

Proceso 3				
U_3	DPMO	n_3	Z_3	Y
156925	9559	1500	3,83	99%
157678	9513	1500	3,83	99%
158843	9443	1500	3,84	99%
159281	9417	1500	3,84	99%
159638	9396	1500	3,84	99%
159928	9379	1500	3,84	99%
159978	9376	1500	3,84	99%

Después de examinar la tendencia de las métricas sigma del proceso 3 presentadas en la Tabla 6, se evidenció que este proceso no tuvo mucha variación, ya que su número de no conformidades (n) se mantuvo en 1500, el nivel sigma (Z) pasó de 3,83 a 3,84, el rendimiento (Y) fue el mismo en 99% y las partes por millón de defectos de oportunidad (DPMO) se mantuvieron entre 9559 y 9376.

Figura 9. Curva de funcionamiento del proceso 3 (Z) frente a (Y)
Figure 9. Operation curve to process 3 (Z) vs (Y)



Tras un análisis detallado de la Figura 9 y la Tabla 6, se observa que los niveles de calidad, evaluados mediante la métrica Z de Seis Sigma, se sitúan en un intervalo de $Z = 3,83$ a $Z = 3,84$. Estos valores reflejan la baja variabilidad del proceso. Estos valores reflejan la baja variabilidad del proceso. En cuanto a los defectos por millón de oportunidades, su disminución fue considerable, pasando de 9559 a 9376, aunque el rendimiento se mantiene en el 99%.

Proceso 4

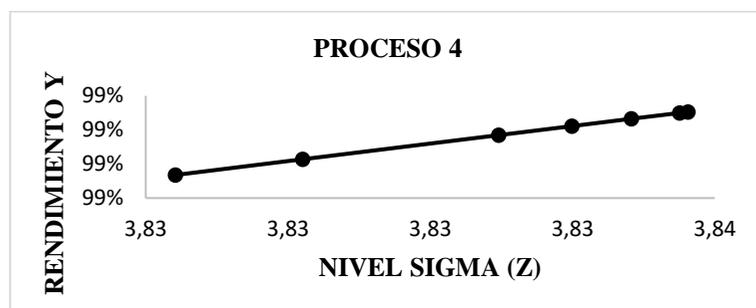
Tabla 7. Resultado de las métricas Seis Sigma aplicadas al proceso 4
Table 7. Result of the Six Sigma metrics applied to process 4

Proceso 4				
U_4	DPMO	n_4	Z_4	Y
155725	9632	1500	3,83	99%
156478	9586	1500	3,83	99%

157643	9515	1500	3,83	99%
158081	9489	1500	3,83	99%
158438	9467	1500	3,83	99%
158728	9450	1500	3,84	99%
158778	9447	1500	3,84	99%

El proceso 4 del sistema de producción estudiado mostró poca variabilidad, producto del cambio limitado en los niveles sigma que se mantuvieron entre 3,83 y 3,84 (Tabla 7).

Figura 10. Curva de funcionamiento al proceso 4 (Z) vs (Y)
Figure 10. Operation curve to process 4 (Z) vs (Y)



La Tabla 7 pone de manifiesto la relevancia de las métricas Seis Sigma en los sistemas productivos para evaluar su capacidad, ya que como se puede observar a medida que el nivel sigma (Z) aumenta de 3,83 a 3,84, el número de defectos por millón de oportunidades presenta un descenso significativo de 9632 a 9447.

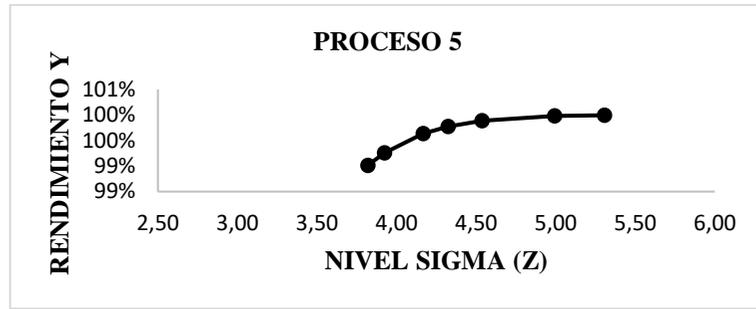
Proceso 5

Tabla 8. Resultado de las métricas Seis Sigma aplicadas al proceso 5
Table 8. Result of the Six Sigma metrics applied to process 5

Proceso 5				
U_5	DPMO	n_5	Z_5	Y
155425	9892	1537	3,82	99%
156178	7435	1161	3,92	99%
157343	3677	578	4,17	100%
157781	2280	359	4,32	100%
158138	1143	180	4,54	100%
158428	228	36	4,99	100%
158478	68	10	5,30	100%

De la Tabla 8 se deduce que a partir de un nivel sigma (Z) en 4,17 el rendimiento (Y) del proceso 5 es perfecto, manteniéndose en el 100%. Así mismo, se puede evidenciar que a partir de un nivel sigma de 5.30, los defectos en partes por millón de oportunidades (DPMO) son muy mínimos de 68. Lo anterior, demostrando la relevancia de las métricas sigma y las curvas de operación para medir el desempeño de los procesos.

Figura 11. Curva de funcionamiento al proceso 5 (Z) vs (Y)
Figure 11. Operation curve to process 5 (Z) vs (Y)



La Tabla 8 y la Figura 11 muestran la tendencia de las métricas Seis Sigma del proceso 5 del sistema paralelo, en las que se observa que para alcanzar un rendimiento (Y) del 100%, es necesario un número mínimo de 10 defectos, lo que responde a un nivel sigma de 5,30. Mientras que, un nivel sigma bajo de 3,82, genera una cantidad elevada de defecto por millón de oportunidades de 9892. Esto refleja la importancia de las curvas operativas de las métricas Seis Sigma para medir la capacidad de los sistemas de reducción y ofrecer una mejora que redunde en la productividad de las producciones.

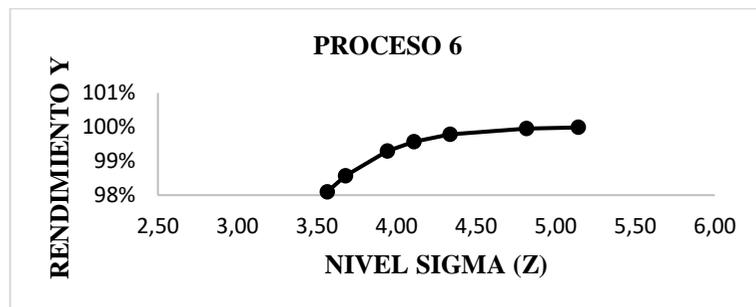
Proceso 6

Tabla 9. Resultado de las métricas Seis Sigma aplicadas al proceso 6
Table 9. Result of the Six Sigma metrics applied to process 6

Process 6				
U_6	DPMO	n_6	Z_6	Y
323113	19033	6149	3,56	98%
324994	14291	4644	3,68	99%
327907	7058	2314	3,94	99%
329001	4374	1438	4,11	100%
329896	2192	723	4,34	100%
330620	437	144	4,82	100%
330746	130	43	5,14	100%

Tras analizar la Tabla 9 del proceso 6 del sistema en paralelo, se observa que para alcanzar un rendimiento perfecto (Y) del 100% es necesario tener menos de 1438 defectos (n) y al menos un nivel sigma (Z) de 4, 11, ya que para un nivel sigma (Z) de 3,94 y una cantidad de defectos (n) en 2314 el rendimiento (Y) comienza a disminuir hasta alcanzar el 99%.

Figura 12. Curva de operación para proceso 6 (Z) vs (Y)
Figure 12. Operation curve to process 6 (Z) vs (Y)



Es evidente la mejora que se ha presentado en el rendimiento del proceso, gracias al aumento que ha tenido el nivel sigma de 3,56 a 5,14. Este aumento indica una disminución en el número, lo que indica que la

calidad y la eficiencia del proceso están mejorando. En general, el proceso 6 presenta un rendimiento excelente, con un rendimiento del sistema del 100% incluso con el nivel sigma más bajo, lo que indica que el proceso presenta pocas desviaciones o defectos.

Tabla 10. Mayores rendimientos del sistema en paralelo.

Table 10. Higher yields of the system in parallel.

Processes	Z	DPMO	n	Y	U
Process 1	5,13	135	43	100%	320000
Process 2	3,92	7501	1200	99%	167478
Process 3	3,84	9376	1500	99%	159978
Process 4	3,84	9447	1500	99%	158778
Process 5	5,30	68	10	100%	158478
Process 6	5,14	130	43	100%	330746

Entre los hallazgos encontrados en esta investigación, se tiene que el proceso que presenta mejor desempeño en el sistema paralelo es el proceso 5, mostrando una variación bastante significativa de sigma (Z) de 3,84 a 5,30, lo que permite una disminución de defectos por millón de oportunidades (DPMO) que oscila entre 9447 y 68, lo que también se representa en un aumento del desempeño que va de 99% a 100%. Cabe destacar la relevancia de las curvas de operación de las métricas sigma para medir el rendimiento de los procesos productivos, así como para ofrecer una mejora que facilite el aumento de las capacidades de los sistemas productivos.

Tabla 11. Rendimientos menores del sistema en paralelo.

Table 11. Minors yields of the system in parallel.

Processes	Z	DPMO	n	Y	U
Process 1	3,56	19218	6149	98%	320000
Process 2	3,91	7647	1200	99%	156925
Process 3	3,83	9559	1500	99%	156925
Process 4	3,83	9632	1500	99%	155725
Process 5	3,82	9892	1537	99%	155425
Process 6	3,56	19033	6149	98%	323113

De igual forma, dentro de los hallazgos de esta investigación, se tiene que el proceso que presenta el menor desempeño en el sistema paralelo es el proceso 1 mostrando una variación bastante significativa de sigma (Z) de 3,91 a 3,56, lo que permite un incremento en los defectos por millón de oportunidades (DPMO) que van de 7647 a 19218, lo que también se representa en una disminución en el desempeño que va de 99% a 98%.

En consonancia con esta investigación, los autores [18] establecen que las estrategias y métricas Seis Sigma parecen adecuadas para satisfacer la demanda emergente de mejorar la calidad de la atención, la eficiencia, los resultados, los procesos o flujos de trabajo y la salud ocupacional de los proveedores. Asimismo, son muchas las investigaciones que han trabajado sobre este tema y su importancia, como es el caso de los autores [25], quienes aplicaron las métricas Seis Sigma para evaluar diferentes dimensiones de calidad de un sistema de producción de pasta comestible basado en las métricas Seis Sigma en condiciones variables como en esta investigación. Del mismo modo los autores, [26] desarrollan un caso de estudio de un proceso OEM que propone métodos preventivos para problemas recurrentes basados en un enfoque Lean Six Sigma donde se aplican diferentes indicadores para monitorizar el proceso utilizando herramientas de control estadístico [27]. Por otro lado, los autores [3] aplicaron métricas Seis Sigma para la calidad de servicio de un centro de atención al cliente en el cual se encontraron resultados significativos con

dimensiones de calidad que estuvieron por encima del valor crítico sigma $z = 3$ y rendimientos mayores al 95% como en la presente investigación que tuvo altos rendimientos y siempre estuvo por encima del valor crítico sigma. Así mismo, se encontró que las dimensiones de calidad de servicio en el centro de atención al cliente están por encima del nivel esperado, así como todas las métricas relacionadas con el método. En esta investigación de un sistema de producción en paralelo, se encontraron variaciones significativas en los resultados de los procesos 6 y 5, pero en general, el sistema de producción tuvo un buen desempeño, alcanzando un nivel sigma superior a cuatro y un rendimiento superior al 90%.

A partir de los resultados obtenidos en esta investigación fue posible evidenciar que los procesos que presentaron mejores desempeños fueron el 1, 5 y 6, con niveles sigma (Z) en 5,13, 5,30 y 5,14 respectivamente, lo que permitió reducir el número de no conformidades (n) de 6149 a 43 (proceso 1), 1537 a 10 (proceso 5) y 6149 a 43 (proceso 6), logrando así que los defectos en partes por millón de oportunidades (DPMO) disminuyeran significativamente al ubicarse en 135, 68 y 130 para cada proceso destacado. Como también se observó que los procesos que obtuvieron menores rendimientos fueron el 2, 3 y 4, con niveles de sigma (Z) en 3,62 (proceso 2), 3,84 (proceso 3) y 3,84 (proceso 4), con un número estable de no conformidades (n) de 1200 para el proceso 2, 1500 para el proceso 3 y 1500 para el proceso 4, con una variación significativa al alza en partes por millón de defectos de oportunidad (DPMO) de 7647, 9559 y 9632 respectivamente, y un rendimiento (Y) del 99% para los 3 procesos, a pesar de que los niveles sigma eran bajos, entre 3,83 y 3,91. Del mismo modo, se observó que el máximo rendimiento (Y) obtenido en el sistema globalmente fue del 99%, con un nivel sigma (Z) de 3,72, lo que permitió reducir los defectos por millón de oportunidades entre 53841 y 12826, así como reducir considerablemente el número de no conformidades de 18036 a 4296. Asimismo, el menor rendimiento (Y) que puede tener en el sistema globalmente es del 95%, con un nivel sigma (Z) en 3,1, lo que provocó que el sistema presentara un elevado número de defectos por millón de oportunidades (DPMO) en 53841 y que las no conformidades (n) aumentaran hasta 18036. Esto demuestra que cuanto mayor es el nivel sigma, los procesos presentan mejores rendimientos (Y) y disminuyen las no conformidades (n), como los defectos por millón de oportunidades (DPMO). También pone de relieve la pertinencia de las métricas sigma y las curvas de operaciones para evaluar eficazmente los sistemas de producción.

Las nuevas curvas de operación de las métricas Seis Sigma propuestas en esta investigación se constituyen en herramientas novedosas y diferentes para: i) analizar la capacidad de un sistema de control estadístico de la calidad en condiciones cambiantes, ii) determinar condiciones de operación del nivel de desempeño de la calidad Z máximas y mínimas del sistema de control estadístico de la calidad y su efecto en DPMO, Y y n (defectos) y iii) identificar subprocesos restrictivos que generan oportunidades de mejora para su intervención y contribuyan a incrementar el desempeño del nivel de calidad del sistema global y los subprocesos parciales.

5. CONCLUSIONES

A partir de los resultados obtenidos, se puede precisar que las curvas operativas de las métricas Seis Sigma son una herramienta clave para medir la eficacia de los procesos y mejorar la calidad de los productos y servicios en condiciones de operación variables. Con la investigación desarrollada y las nuevas curvas de operación de las métricas Seis Sigma propuestas, es posible analizar el desempeño de los niveles de calidad de los diferentes sistemas de producción y sus procesos, bajo condiciones variables, considerando las condiciones de operación existentes en el sistema de producción, lo que posibilita el análisis y mejora de este contexto productivo.

Asimismo, este trabajo aporta teóricamente al campo del control estadístico de la calidad una metodología nueva, confiable, precisa e innovadora, considerando la articulación de los conceptos de estadística, matemáticas, evaluación de la calidad de un sistema de producción, métricas Seis Sigma y curvas de operación de control estadístico contextualizada a las métricas de Seis Sigma, que permitió evaluar el

proceso propuesto y prever su desempeño en condiciones de operación máximas y mínimas permitidas de acuerdo a las condiciones propias del sistema de producción. A partir de los resultados de la aplicación de las curvas de operación se puede observar que la capacidad máxima del sistema analizado tiene un nivel de calidad sigma (Z) de 5,30, lo que demuestra que los defectos $s(n)$ se pueden reducir de 6149 a 10, los defectos por millón de oportunidades (DPMO) pasan de 19218 a 68 a y el rendimiento se puede aumentar de 98% a 100%.

También se puede concluir, como aporte metodológico que las nuevas curvas de operación propuestas permiten evaluar el desempeño del nivel sigma de calidad (Z), y a través de un análisis de sensibilidad y ver su efecto sobre DPMO, no conformidades (n), defectos por millón de oportunidades (DPMO) y desempeño (Y) del sistema de producción paralelo convergente, y sus procesos, con lo que se pueden tomar decisiones para mejorar la calidad a los usuarios finales. Y identificar prioridades de intervención de los procesos en función de las debilidades del sistema de operación de acuerdo a las condiciones de operación.

Como futuras investigaciones se invita a la comunidad científica internacional y nacional, a los responsables de los procesos y a los investigadores en el área del control estadístico univariado y multivariados a replicar la metodología propuesta en otro tipo de sistemas de control de la calidad de producción y servicios. Que permitan identificar las capacidades máximas y mínimas de desempeño de control de calidad del nivel sigma Z, en condiciones variables, en diferentes contextos empresariales, con el fin de tomar decisiones oportunas y pertinentes para la mejora de la calidad en los sistemas de producción de bienes y servicios y así satisfacer las expectativas de los clientes.

6. REFERENCIAS

- [1] O. M. Ikumapayi, E. T. Akinlabi, F. M. Mwema, y O. S. Ogbonna, "Six sigma versus lean manufacturing – An overview", *Mater. Today*, vol. 26, pp. 3275–3281, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.986>
- [2] A. Bagherian, M. Gershon, y V. Swarnakar, "Identification of learning organisation key elements leading to successful implementation of Six Sigma: an empirical study", *Int. J. Product. Qual. Manag.*, vol. 38, núm. 3, p. 361, 2023. <https://doi.org/10.1504/ijpqm.2023.129612>
- [3] O. Fontalvo, T. Fontalvo, y R. Herrera, "Evaluation method of the sigma level multidimensional capacity of the service dimensions in a call centre of a telephone company", *Int. J. Product. Qual. Manag.*, vol. 34, núm. 3, p. 319, 2021. <https://doi.org/10.1504/ijpqm.2021.119787>
- [4] A. G. Banquez, y T. J. Fontalvo, "Global performance evaluation based on multivariable statistical control of a public utility company", *Pesqui. Oper.*, vol. 43, 2023. <https://doi.org/10.1590/0101-7438.2023.043.00270103>
- [5] T. J. Fontalvo, y A. G. Banquez, "Comparative analysis of multivariate capacity indicators for serial and parallel systems", *Int. J. Six Sigma Compet. Advant.*, vol. 1, núm. 1, 2023. <https://doi.org/10.1504/IJSSCA.2023.10058903>
- [6] T. J. Fontalvo, R. Herrera, y J. Zambrano, "Three-phase method to assess the logistics service using Six Sigma metrics, Hotelling's T-square control chart and a principal component capacity indicator", *Int. J. Product. Qual. Manag.*, vol. 35, núm. 1, p. 17, 2022. <https://doi.org/10.1504/ijpqm.2022.120720>
- [7] T. Fontalvo, E. D. Dominguez, y Y. Gonzalez, "A Six Sigma approach to measure service quality in key dependencies of a government ministry", *Int. J. Technol. Policy Manag.*, vol. 21, núm. 4, p. 317, 2021. <https://doi.org/10.1504/ijtpm.2021.119701>
- [8] T. Fontalvo, E. D. Dominguez, y O. Fontalvo, "Six Sigma method to assess the quality of the service in a gas utility company", *Int. J. Process Manag. Benchmarking*, vol. 12, núm. 2, p. 220, 2022. <https://doi.org/10.1504/ijpmb.2022.121628>
- [9] M. T. Patel y D. Desai, "Implementation of Six Sigma in the small-scale ceramic industry and its holistic assessment", *Int. J. Qual. Eng. Technol.*, vol. 9, núm. 2, pp. 110–144, 2023. <https://doi.org/10.1504/ijqet.2023.131553>
- [10] P. Sharma, A. Gupta, S. C. Malik, P. C. Jha, y M. C. B. Pinto, "An application of Six Sigma DMAIRC model: case study of a manufacturing organisation", *Int. J. Adv. Oper. Manag.*, vol. 14, núm. 3, p. 280, 2022. <https://doi.org/10.1504/ijaom.2022.125097>
- [11] T. Fontalvo, E. D. Dominguez, y O. Fontalvo, "Six Sigma method to assess the quality of the service in a gas utility company", *Int. J. Process Manag. Benchmarking*, vol. 12, núm. 2, p. 220, 2022. <https://doi.org/10.1504/ijpmb.2022.121628>
- [12] N. Kumar, A. Singh, S. Gupta, M. S. Kaswan, y M. Singh, "Integration of Lean manufacturing and Industry 4.0: a bibliometric analysis", *TQM J.*, 2023. <https://doi.org/10.1108/tqm-07-2022-0243>
- [13] C. Chen, y W. Chang, "Six Sigma approach with response surface methodology for improving MEMS capacitive accelerometer manufacturing process", *Microsystem Technologies*, vol. 26, núm. 2, pp. 537–546, 2023. <https://doi.org/10.1007/s00542-019-04522-6>
- [14] H. Chhatwal, N. Bhasin, A. Bassi, S. Sharma, y R. Gupta, "Implementation of Lean Six Sigma in industrial manufacturing applications: a case study", *Int. J. Six Sigma Compet. Advant.*, vol. 14, núm. 1, p. 70, 2022. <https://doi.org/10.1504/ijssca.2022.124298>

- [15] A. Trubetskaya, O. McDermott, y A. Ryan, “Application of Design for Lean Six Sigma to strategic space management”, *TQM J.*, vol. 35, núm. 9, pp. 42–58, 2023. <https://doi.org/10.1108/tqm-11-2022-0328>
- [16] F. E. Achibat, A. Lebkiri, E. M. Aouane, H. Lougraimzi, N. Berrid, y A. Maqboul, “Analysis of the impact of Six Sigma and Lean Manufacturing on the performance of companies”, *Manag. Syst. Prod. Eng.*, vol. 31, núm. 2, pp. 191–196, 2023. <https://doi.org/10.2478/mspe-2023-0020>
- [17] M.-V. Sánchez-Rebull, R. Ferrer-Rullan, A.-B. Hernández-Lara, y A. Niñerola, “Six Sigma for improving cash flow deficit: a case study in the food can manufacturing industry”, *Int. J. Lean Six Sigma*, vol. 11, núm. 6, pp. 1105–1126, 2020. <https://doi.org/10.1108/ijlss-12-2018-0137>
- [18] H. S. Sodhi, “A comparative analysis of lean manufacturing, Six Sigma and Lean Six Sigma for their application in manufacturing organisations”, *Int. J. Process Manag. Benchmarking*, vol. 13, núm. 1, p. 127, 2023. <https://doi.org/10.1504/ijpmb.2023.127902>
- [19] T. Ahmed, R. Begum, y S. Ahmed, “Application of Six Sigma tools in footwear industry: an emerging economy case”, *Int. J. Product. Qual. Manag.*, vol. 38, núm. 2, p. 211, 2023. <https://doi.org/10.1504/ijpqm.2023.129607>
- [20] H. Hadipour, M. Amiri, y M. Sharifi, “Redundancy allocation in series-parallel systems under warm standby and active components in repairable subsystems”, *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, vol. 192, núm. 106048, p. 106048, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.res.2018.01.007>
- [21] H. Aguilar, A. García-Villoria, y R. Pastor, “A survey of the parallel assembly lines balancing problem”, *Comput. Oper. Res.*, vol. 124, núm. 105061, p. 105061, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2020.105061>
- [22] D. Mronga, S. Kumar, y F. Kirchner, “Whole-body control of series-parallel hybrid robots”, en 2022 International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2022.
- [23] A. Russell y S. Taghipour, “Multi-parallel work centers scheduling optimization with shared or dedicated resources in low-volume low-variety production systems”, *Appl. Math. Model.*, vol. 80, pp. 472–505, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2019.11.047>
- [24] B. J. Singh y S. Mahendru, “Enhancing the capability of a PVC pipe extrusion process through the Six Sigma’s strategic approach”, *Int. J. Six Sigma Compet. Advant.*, vol. 13, núm. 1/2/3, p. 311, 2021. <https://doi.org/10.1504/ijssca.2021.120220>
- [25] T. Fontalvo, J. Morelos, y N. Garcia, “Evaluación de la calidad de la producción de pastas comestibles mediante Seis Sigma”, *Investig. Innov. Ing.*, vol. 10, núm. 1, pp. 160–177, 2022. <https://doi.org/10.17081/invinno.10.1.5696>
- [26] V. R. Sreedharan, R. Trehan, M. Dhanya, y P. Arunprasad, “Lean Six Sigma implementation in an OEM: a case-based approach”, *Int. J. Process Manag. Benchmarking*, vol. 10, núm. 2, p. 147, 2020. <https://doi.org/10.1504/ijpmb.2020.106789>
- [27] S. Sikder, I. Mukherjee, y S. C. Panja, “A synergic multivariate statistical process control framework for monitoring, diagnosis, and adjustment of multiple response abrasive machining processes”, *Int. J. Ind. Syst. Eng.*, vol. 33, núm. 3, p. 314, 2019. <https://doi.org/10.1504/ijise.2019.103443>