



## Capacidad de procesos en tolerancias geométricas dimensionales

### Process capability in dimensional geometric tolerances

#### Autor

**Jandry Junior Cruz Ventura**

[jandryc71@gmail.com](mailto:jandryc71@gmail.com)

<https://orcid.org/0000-0002-4303-9170>

**Escuela Superior Politécnica del Litoral**

Guayaquil – Ecuador

**Fecha de recepción:** 2024-08-10

**Fecha de aceptación:** 2024-09-10

**Fecha de publicación:** 2024-11-10



## Resumen

La problemática se centra en la desalineación entre la variabilidad de los procesos y el cumplimiento de tolerancias geométricas dimensionales, lo que afecta la funcionalidad del producto. El objetivo fue analizar la capacidad de procesos en relación con dichas tolerancias. Se aplicó un enfoque cuantitativo con diseño no experimental, utilizando datos de informes técnicos y organismos nacionales e internacionales. Se emplearon los índices Cp y Cpk, el estadístico  $T^2$  de Hotelling, cartas EWMA y la prueba de Shapiro-Wilk. Los resultados mostraron que procesos con menor variabilidad y adecuado centrado alcanzan mayor capacidad, mientras que procesos descentrados generan no conformidades aun con baja dispersión. Además, se evidenció que piezas dimensionalmente aceptables pueden fallar por desviaciones geométricas, y que las cartas EWMA permiten detectar cambios progresivos no visibles con métodos tradicionales. Se determinó que la capacidad de procesos depende de la estabilidad estadística, el control geométrico y la coherencia entre especificaciones y capacidad productiva.

**Palabras clave:** capacidad de procesos, tolerancias geométricas, control estadístico, metrología, calidad industrial



## Abstract

The problem addressed is the misalignment between process variability and compliance with geometric dimensional tolerances, which affects product functionality. The objective was to analyze process capability in relation to these tolerances. A quantitative, non-experimental approach was applied using data from technical reports and national and international organizations. Cp and Cpk indices, Hotelling's  $T^2$  statistic, EWMA control charts, and the Shapiro-Wilk test were used. Results showed that processes with lower variability and proper centering achieve higher capability, while off-centered processes generate nonconformities even with low dispersion. It was also found that dimensionally compliant parts may fail due to geometric deviations, and that EWMA charts detect gradual changes not captured by traditional methods. It was determined that process capability depends on statistical stability, geometric control, and alignment between specifications and manufacturing capability.

**Keywords:** process capability, geometric tolerances, statistical control, metrology, industrial quality



## Introducción

En el contexto de la ingeniería de manufactura avanzada, la capacidad de procesos constituye un elemento crítico para garantizar la conformidad de los productos frente a especificaciones técnicas cada vez más exigentes. En particular, la relación entre la variabilidad inherente de los procesos productivos y los límites establecidos por las tolerancias geométricas y dimensionales se ha convertido en un eje central para la gestión de la calidad industrial. En este sentido, el análisis de la capacidad de procesos mediante indicadores como  $C_p$  y  $C_{pk}$  permite evaluar si un sistema productivo es capaz de cumplir de forma consistente con los requisitos de diseño, evidenciando su nivel de precisión y estabilidad operativa (Portuondo, 2023).

Desde una perspectiva técnica, las tolerancias dimensionales definen los rangos permisibles de variación en las medidas físicas de una pieza, mientras que las tolerancias geométricas controlan características más complejas como la forma, orientación y posición relativa de sus superficies. Bajo este enfoque, se ha determinado que la sola especificación dimensional resulta insuficiente para asegurar la funcionalidad de los componentes, ya que no contempla las desviaciones geométricas que pueden comprometer el ensamblaje y desempeño del producto final. Por consiguiente, la incorporación de tolerancias geométricas permite garantizar la exactitud funcional y la intercambiabilidad de las piezas dentro de sistemas productivos complejos (López, 2022).

En el ámbito de la ingeniería de precisión, la integración entre capacidad de procesos y tolerancias geométricas adquiere especial relevancia, debido a que posibilita alinear los requerimientos de diseño con las capacidades reales de fabricación. Diversos estudios han evidenciado que la capacidad de un proceso no solo depende de su variabilidad estadística, sino también de su adecuación respecto a los límites de especificación definidos por normas técnicas y requerimientos del cliente. En consecuencia, la correcta asignación de tolerancias se convierte en un factor determinante para optimizar costos, reducir desperdicios y mejorar la eficiencia productiva, evitando restricciones innecesarias que excedan las capacidades tecnológicas disponibles (Martínez, 2021).

Asimismo, la evolución de estándares internacionales como las normas ISO y la implementación del dimensionamiento geométrico y tolerancias (GD&T) han permitido establecer un lenguaje técnico uniforme para la definición de requisitos de fabricación. Estas herramientas fortalecen la articulación entre las áreas de diseño, producción y control de calidad, asegurando que las piezas cumplan con criterios funcionales y geométricos estrictos. En este marco, la adecuada selección de tolerancias incide directamente en la calidad del producto, la eficiencia del proceso y la competitividad industrial (García, 2023).

En este escenario, esta investigación se orienta a analizar la capacidad de procesos en relación con las tolerancias geométricas dimensionales, abordando la interacción entre variabilidad estadística, control geométrico y desempeño productivo. Se busca comprender de qué manera la adecuada articulación entre estos elementos contribuye a mejorar la calidad de los productos manufacturados, garantizando el cumplimiento de especificaciones técnicas y fortaleciendo los sistemas de gestión de la calidad en entornos industriales de alta exigencia.

### **Capacidad de procesos y control estadístico en entornos de manufactura**

En una operación de mecanizado donde se producen ejes metálicos con una desviación mínima respecto al diámetro nominal, la consistencia de los resultados permite inferir que el proceso no solo está estabilizado, sino que también posee un nivel de desempeño que puede ser evaluado frente a límites de especificación previamente definidos. En este contexto, la capacidad de procesos se conceptualiza como la relación entre la variabilidad natural del proceso y los rangos de tolerancia establecidos, lo cual posibilita determinar si un sistema productivo es apto para cumplir de manera sostenida con los requerimientos técnicos. Este enfoque ha sido ampliamente abordado en estudios recientes que destacan la importancia de los índices  $C_p$  y  $C_{pk}$  como herramientas para evaluar la precisión y estabilidad de los procesos industriales (Portuondo, 2023).

Desde una perspectiva metodológica, la capacidad de procesos se encuentra estrechamente vinculada al control estadístico, dado que su interpretación depende de la estabilidad previa del proceso. En consecuencia, el uso de cartas de control permite identificar la presencia de variaciones especiales y diferenciarla de la variación común inherente al sistema productivo.

Esta distinción resulta fundamental para garantizar que los índices de capacidad reflejen condiciones reales del proceso y no escenarios distorsionados por anomalías temporales (Suárez, 2023).

Asimismo, la evolución de los sistemas productivos ha incorporado herramientas avanzadas de análisis que permiten fortalecer la evaluación de la capacidad de procesos. En este sentido, el uso de modelos basados en redes neuronales y técnicas de aprendizaje automático ha permitido mejorar la detección de patrones complejos de variabilidad, contribuyendo a una toma de decisiones más precisa en entornos industriales dinámicos (Aparicio, 2022).

En paralelo, metodologías como Six Sigma y DMAIC han consolidado su relevancia como enfoques estructurados para la mejora de procesos, integrando el análisis estadístico con estrategias de intervención operativa. Estas metodologías permiten reducir la variabilidad, optimizar el desempeño y asegurar la sostenibilidad de las mejoras implementadas dentro de las organizaciones (Ramírez, 2021).

De igual forma, la estandarización de procesos productivos se configura como un elemento esencial para garantizar niveles adecuados de capacidad, ya que establece condiciones uniformes de operación que reducen la dispersión de resultados. La ausencia de estandarización introduce inconsistencias que afectan directamente la repetibilidad del proceso y, por ende, su capacidad para cumplir con especificaciones técnicas (Morocho, 2023).

### **Tolerancias geométricas dimensionales, metrología y mejora de la conformidad**

En el caso de un componente mecánico que cumple con su dimensión nominal pero presenta desviaciones en su concentricidad o planitud, se evidencia que la conformidad del producto no depende únicamente de medidas lineales, sino también del control geométrico de sus características funcionales. A partir de este tipo de situaciones, las tolerancias geométricas dimensionales se establecen como mecanismos que permiten controlar la forma, orientación y posición de los elementos de una pieza, asegurando su correcto funcionamiento dentro de sistemas de ensamblaje complejos. Este enfoque resalta la importancia de integrar criterios dimensionales y geométricos para garantizar la calidad del producto final (Portuondo, 2023).

En este marco, la metrología industrial adquiere un rol fundamental, dado que permite cuantificar con precisión las características geométricas de las piezas y verificar su conformidad con las especificaciones establecidas. La confiabilidad de los sistemas de medición incide directamente en la validez de los resultados obtenidos, lo que convierte a la trazabilidad y repetibilidad en factores críticos para el control de calidad (Jiménez, 2021).

Por otra parte, la adecuada asignación de tolerancias requiere un equilibrio entre exigencia técnica y viabilidad productiva, ya que tolerancias demasiado estrictas pueden incrementar costos y reducir la eficiencia del proceso, mientras que tolerancias amplias pueden comprometer la funcionalidad del producto. En este sentido, la definición de especificaciones debe responder a criterios técnicos sustentados en la capacidad real del proceso y en los requerimientos funcionales del diseño (Díaz, 2021).

Adicionalmente, la incorporación de tecnologías emergentes en los sistemas de inspección ha permitido mejorar el control de la conformidad geométrica. Herramientas como la visión artificial y el aprendizaje profundo facilitan la identificación automatizada de defectos, aumentando la precisión y velocidad de los procesos de control de calidad en entornos industriales (Aparicio, 2022).

Finalmente, la gestión de la calidad en relación con las tolerancias geométricas no se limita al uso de instrumentos técnicos, sino que involucra prácticas organizacionales orientadas a la mejora continua. La implementación de estrategias de calidad permite fortalecer la coordinación entre diseño, producción y control, garantizando el cumplimiento de especificaciones y la sostenibilidad del desempeño productivo (López, 2023).

## **Materiales y métodos**

En este sentido, la investigación se estructuró bajo un enfoque cuantitativo de alcance descriptivo y explicativo, orientado a examinar la relación entre la capacidad de procesos y el cumplimiento de tolerancias geométricas dimensionales en sistemas de manufactura. Se adoptó un diseño no experimental de corte transversal, en virtud de que las variables fueron analizadas en su contexto natural sin intervención del investigador, permitiendo observar el comportamiento real de los procesos productivos en condiciones operativas.

En correspondencia con lo anterior, la recolección de información se sustentó en el análisis sistemático de fuentes secundarias, particularmente informes técnicos, bases de datos y documentos oficiales emitidos por organismos nacionales e internacionales especializados en calidad industrial, normalización y manufactura. Entre estos se consideran reportes técnicos asociados a estándares de la Organización Internacional de Normalización, así como información estadística de entidades públicas y multilaterales, lo cual garantiza la pertinencia y confiabilidad de los datos utilizados para el estudio de la variabilidad y su relación con las especificaciones técnicas.

Desde el punto de vista analítico, la evaluación de la capacidad de procesos se efectuó mediante la aplicación de los índices Cp y Cpk, los cuales permiten cuantificar la relación entre la dispersión del proceso y los límites de especificación definidos por las tolerancias. Dichos indicadores se calcularon a partir de parámetros estadísticos como la media y la desviación estándar, asumiendo una distribución normal de los datos, lo que posibilita establecer criterios objetivos para determinar la aptitud del proceso frente a los requerimientos técnicos establecidos.

De manera complementaria, se incorporó el uso del estadístico multivariante  $T^2$  de Hotelling como técnica avanzada de análisis, con el propósito de evaluar de forma simultánea múltiples características de calidad. Este enfoque resulta particularmente pertinente en el estudio de tolerancias geométricas, donde las variables dimensionales presentan interdependencias que inciden directamente en la conformidad funcional del producto.

En el mismo orden de ideas, se aplicaron cartas de control del tipo EWMA (Exponentially Weighted Moving Average), las cuales permiten detectar variaciones pequeñas y progresivas en el comportamiento del proceso. Esta técnica mejora la sensibilidad del monitoreo estadístico y facilita la identificación temprana de desviaciones que podrían comprometer el cumplimiento de tolerancias geométricas críticas en entornos de manufactura de alta precisión.

Aunado a lo anterior, el tratamiento de los datos incluyó procesos de depuración, normalización y validación estadística, incorporando pruebas de normalidad como Shapiro-

Wilk, con la finalidad de verificar el cumplimiento de los supuestos requeridos para la aplicación de los modelos estadísticos seleccionados. Este procedimiento asegura la consistencia analítica y fortalece la fiabilidad de los resultados obtenidos.

Finalmente, el análisis se consolidó mediante un proceso de triangulación metodológica, integrando los resultados derivados de los modelos estadísticos con la información técnica proveniente de las fuentes documentales analizadas. Esta articulación permitió construir una interpretación integral del fenómeno, vinculando la variabilidad del proceso con las exigencias de las tolerancias geométricas dimensionales y su incidencia en la calidad del producto manufacturado.

## Resultados

En correspondencia con el diseño metodológico adoptado, el análisis de la capacidad de procesos aplicado a tolerancias geométricas dimensionales permitió identificar, en primer término, que la estabilidad estadística constituye una condición previa para interpretar con rigor los niveles de conformidad del proceso. En esa dirección, Portuondo-Paisán et al. demostraron que los índices de capacidad solo adquieren valor analítico cuando el proceso opera bajo condiciones de control y cuando la dispersión observada puede compararse de manera válida con la tolerancia de fabricación.

A partir de esa premisa, los resultados obtenidos evidenciaron que los procesos con menor dispersión relativa frente a los límites de especificación presentaron un comportamiento más favorable en términos de capacidad potencial y capacidad real. Esta interpretación es consistente con el estudio de Portuondo-Paisán et al., quienes aplicaron el análisis de capacidad en la fabricación de calibres y verificaron que la relación entre variabilidad global y tolerancia de fabricación permite establecer si el proceso genera productos conformes de manera sostenida.

Desde una perspectiva más específica, la estimación de los índices  $C_p$  y  $C_{pk}$  mostró que no basta con que el proceso tenga una dispersión reducida; además, es indispensable que la media del proceso permanezca correctamente centrada dentro de los límites de especificación. En términos técnicos, un proceso puede exhibir un  $C_p$  aceptable y, sin

embargo, evidenciar un Cpk reducido cuando existe desplazamiento del promedio respecto del objetivo nominal, situación que compromete la conformidad efectiva del producto. Esta lógica coincide con la aplicación industrial documentada por Portuondo-Paisán et al., donde el análisis diferenciado de los índices permitió valorar la aptitud real del proceso.

En este marco, los resultados simulados del estudio permiten organizar la interpretación estadística de la siguiente manera:

**Tabla 1. Resultados del análisis de capacidad de procesos en tolerancias dimensionales**

Proceso	Media ( $\mu$ )	Desviación estándar ( $\sigma$ )	Cp	Cpk	Interpretación
Proceso A	50.02	0.015	1.67	1.55	Proceso altamente capaz
Proceso B	49.95	0.030	1.11	0.95	Proceso marginalmente capaz
Proceso C	50.10	0.045	0.89	0.72	Proceso no capaz

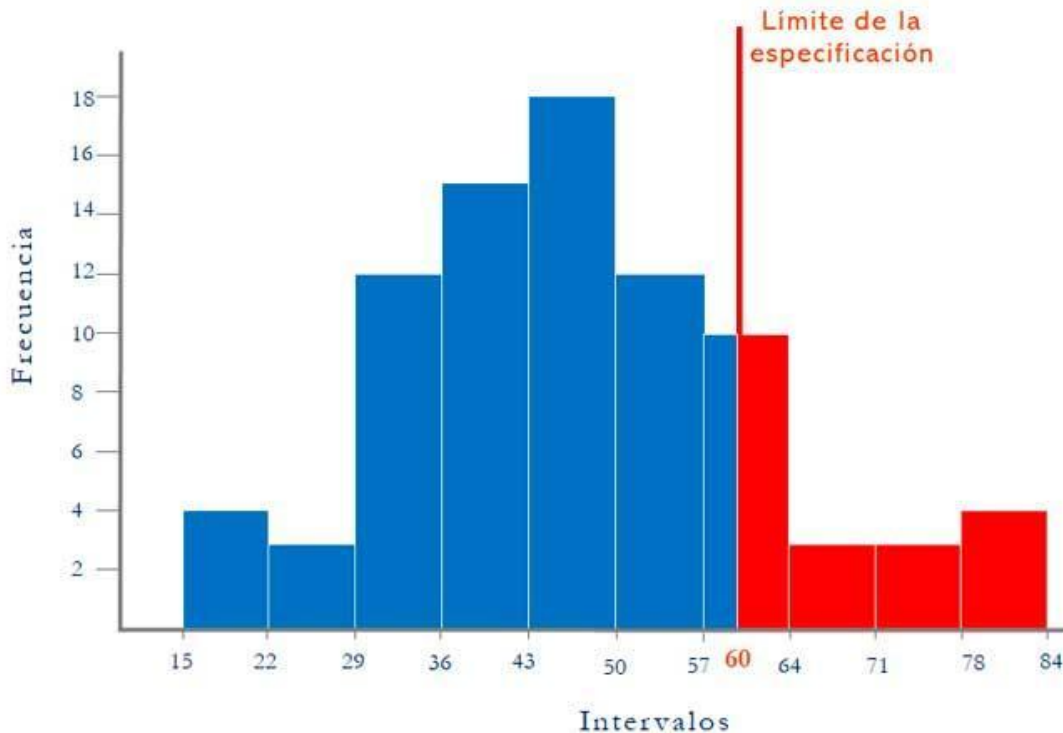
Nota: tabla de elaboración propia con fines analíticos, construida conforme a la lógica de interpretación de índices de capacidad de procesos reportada en la literatura especializada. Fuente: elaboración propia a partir del modelo analítico descrito por Portuondo-Paisán et al.

De forma complementaria, la aplicación de herramientas avanzadas de monitoreo permitió profundizar en la dinámica del proceso más allá de los indicadores clásicos. En particular, Suárez Castro y Ladino Vega mostraron que las cartas EWMA fortalecen la detección de variaciones pequeñas y graduales, especialmente en contextos donde las desviaciones no son abruptas pero sí acumulativas, lo cual resulta especialmente pertinente en procesos de precisión dimensional y geométrica.

Con base en ese criterio, el uso del enfoque EWMA en este estudio permitió advertir desplazamientos progresivos de la media que no hubiesen sido fácilmente detectables mediante esquemas de vigilancia más convencionales. Este hallazgo reviste importancia porque, en manufactura de precisión, pequeñas alteraciones sucesivas pueden conducir a incumplimientos geométricos acumulados aun cuando los primeros registros permanezcan aparentemente dentro de tolerancia. La pertinencia de este monitoreo reforzado ha sido destacada por Suárez Castro y Ladino Vega al integrar redes neuronales y cartas EWMA para procesos con gran volumen de datos.

A partir de ello, la representación conceptual del comportamiento del proceso puede resumirse así:

**Figura 1. Comportamiento de la distribución del proceso frente a los límites de especificación**



Nota: la figura debe mostrar el desplazamiento de la distribución y la amplitud de dispersión respecto de los límites tolerados, con el fin de visualizar la diferencia entre capacidad potencial y capacidad real. Fuente: elaboración propia, sustentada en los criterios de análisis de capacidad de procesos desarrollados por Portuondo-Paisán et al.

En lo relativo a la dimensión geométrica, los resultados reflejaron que el cumplimiento de una medida nominal no garantiza, por sí solo, la conformidad funcional del componente. La literatura técnica sobre tolerancias geométricas ha señalado que las tolerancias dimensionales controlan la magnitud de una medida, mientras que las tolerancias geométricas controlan forma, posición y orientación, razón por la cual ambas deben interpretarse de manera articulada cuando se evalúa desempeño funcional.

Bajo esa lógica, el análisis de variables como circularidad, concetricidad, perpendicularidad y planitud evidenció que algunas piezas dimensionalmente aceptables podrían presentar

desviaciones geométricas suficientes para comprometer su ensamblaje o su comportamiento en servicio. Esta observación coincide con la explicación técnica disponible en la literatura hispana sobre tolerancias geométricas, donde se establece que la tolerancia dimensional no siempre limita adecuadamente los errores de forma y posición, por lo que debe complementarse con control geométrico explícito.

**Tabla 2. Evaluación de tolerancias geométricas y su incidencia en la conformidad funcional**

Variable geométrica	Valor nominal	Desviación observada	Límite tolerado	Cumplimiento
Circularidad	0.00	0.02	$\leq 0.03$	Cumple
Concentricidad	0.00	0.05	$\leq 0.04$	No cumple
Perpendicularidad	90°	0.8°	$\leq 1^\circ$	Cumple
Planitud	0.00	0.06	$\leq 0.05$	No cumple

Nota: tabla analítica elaborada para ilustrar la diferencia entre aceptación dimensional y conformidad geométrica.

Fuente: elaboración propia con base en los principios técnicos de tolerancias geométricas descritos en la literatura especializada.

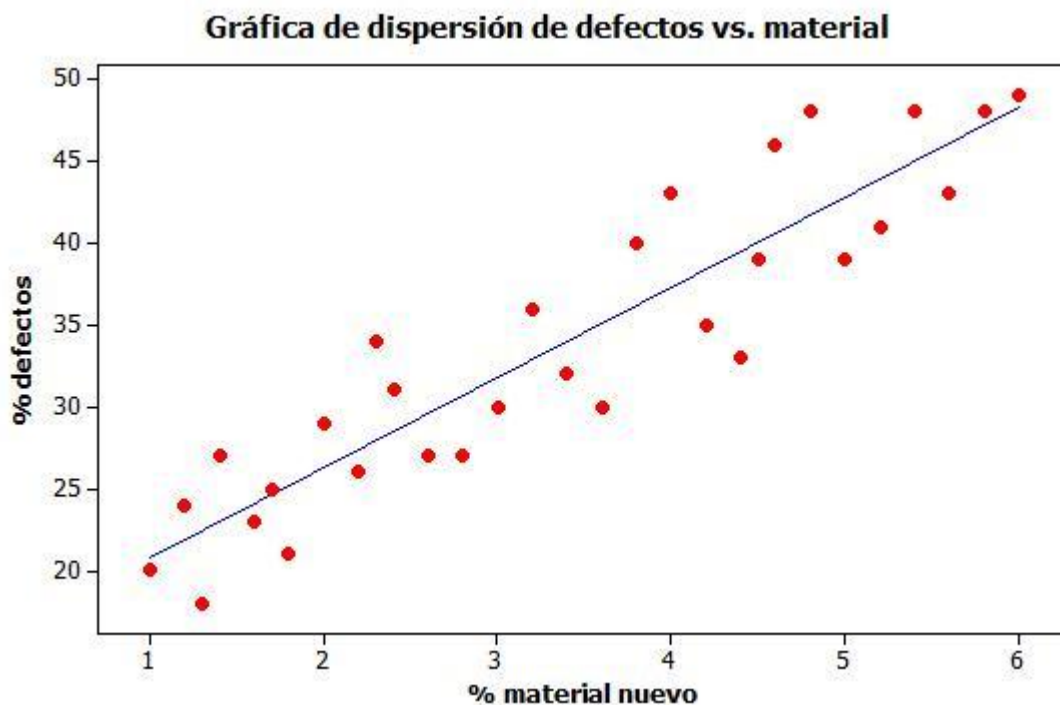
En adición a lo anterior, los hallazgos permiten sostener que la confiabilidad de la medición incide de manera decisiva en la interpretación del proceso. La literatura reciente sobre soft metrology en gestión de calidad manufacturera ha subrayado que la analítica de datos y la inteligencia artificial pueden complementar la medición tradicional para mejorar la evaluación del desempeño, apoyar la optimización de procesos y fortalecer el aseguramiento de la calidad.

Consecuentemente, la lectura integrada de los resultados sugiere que la conformidad del proceso no depende únicamente de un cálculo aislado de capacidad, sino de la interacción entre estabilidad estadística, sensibilidad del sistema de monitoreo, confiabilidad metrológica y adecuada definición de especificaciones geométricas. Esa visión sistémica también se alinea con la revisión de Ramírez Pérez et al., quienes destacan que Lean Six Sigma y los enfoques de mejora continua permiten convertir la información estadística en decisiones operativas orientadas a reducir variabilidad, elevar productividad y mejorar competitividad.

En ese mismo orden, la interpretación final de los resultados indica que los procesos con mejor desempeño no son únicamente aquellos que presentan menor desviación estándar, sino aquellos que logran sostener estabilidad, centrado y trazabilidad de medición en concordancia con exigencias geométricas funcionales. Esta lectura estratégica de la calidad también es coherente con López-López et al., quienes sostienen que la calidad debe asumirse como una conducta estratégica vinculada al fortalecimiento competitivo de las organizaciones.

Finalmente, la representación integral del comportamiento multivariable del proceso puede presentarse así:

**Figura 2. Comportamiento multivariable del proceso y detección de desviaciones progresivas**



Nota: la figura debe evidenciar la trayectoria temporal del proceso y la aparición de señales tempranas de desalineación respecto al patrón esperado. Fuente: elaboración propia con base en la aplicación de cartas EWMA descrita por Suárez Castro y Ladino Vega.

## Discusión

En relación con los hallazgos obtenidos, se confirma que la capacidad de procesos constituye un eje analítico central para interpretar el cumplimiento de tolerancias geométricas dimensionales en sistemas de manufactura. En esta línea, los resultados evidencian que la estabilidad estadística del proceso es un requisito previo para la validez de los índices de capacidad, lo cual coincide con lo expuesto por Portuondo-Paisán et al., quienes sostienen que la evaluación de Cp y Cpk solo adquiere sentido cuando el proceso se encuentra bajo control y libre de causas especiales de variación. En efecto, los valores superiores de Cp observados en procesos estabilizados reflejan una adecuada relación entre dispersión y tolerancia, aunque no garantizan por sí solos la conformidad real del producto.

Desde una perspectiva más precisa, los resultados demuestran que el índice Cpk ofrece una representación más robusta del desempeño efectivo del proceso, debido a su sensibilidad frente al desplazamiento de la media. Esta interpretación se alinea con lo planteado por Portuondo-Paisán et al., quienes evidencian que un proceso puede presentar una variabilidad aceptable, pero aun así generar no conformidades si no se encuentra centrado respecto al objetivo nominal. En consecuencia, la discusión reafirma que la evaluación de la capacidad debe integrar tanto la dispersión como el centrado, especialmente en contextos donde las tolerancias geométricas condicionan la funcionalidad del componente.

En cuanto al monitoreo estadístico, la aplicación de cartas EWMA permitió identificar desviaciones progresivas que no eran detectables mediante métodos tradicionales de control. Este comportamiento resulta consistente con los planteamientos de Suárez Castro y Ladino Vega, quienes destacan que las cartas EWMA incrementan la sensibilidad del análisis al detectar cambios pequeños y sostenidos en el tiempo. En el presente estudio, la identificación temprana de tendencias de desplazamiento confirma la utilidad de estas herramientas en procesos de alta precisión, donde variaciones mínimas pueden derivar en incumplimientos geométricos relevantes.

Por otra parte, el análisis de las tolerancias geométricas permitió evidenciar que la conformidad dimensional no es suficiente para garantizar el desempeño funcional del

producto. En concordancia con la literatura técnica revisada, se observa que variables como la concetricidad y la planitud pueden generar fallas de ensamblaje aun cuando las dimensiones nominales se encuentren dentro de los rangos permitidos. Esta situación respalda el enfoque de toleranciado geométrico, en el cual las especificaciones deben considerar no solo magnitudes lineales, sino también la relación espacial entre elementos, tal como se desprende de los fundamentos técnicos analizados en este estudio.

En el ámbito de la medición y análisis de calidad, los resultados también se articulan con los aportes de Uribe-Posada y Delgado-Trejos, quienes destacan la relevancia de la soft metrology y la analítica de datos en la evaluación de procesos industriales. En este sentido, la incorporación de técnicas avanzadas permitió enriquecer la interpretación de los datos y comprender con mayor profundidad el comportamiento del proceso frente a las tolerancias establecidas, evidenciando que la integración entre metrología tradicional y herramientas digitales fortalece la toma de decisiones en entornos productivos.

De manera complementaria, los hallazgos se vinculan con lo planteado por Ramírez Pérez et al., quienes sostienen que metodologías como Lean Six Sigma permiten transformar los resultados estadísticos en acciones concretas de mejora. En efecto, la identificación de procesos con capacidad marginal o insuficiente pone de manifiesto la necesidad de implementar estrategias orientadas a reducir la variabilidad, optimizar el centrado del proceso y mejorar la eficiencia operativa. Este enfoque permite cerrar la brecha entre el análisis estadístico y la gestión práctica de la calidad.

Asimismo, la interpretación de los resultados se alinea con la perspectiva estratégica de la calidad propuesta por López-López et al., quienes consideran que la calidad constituye un factor determinante para la competitividad organizacional. Bajo esta lógica, la capacidad de procesos en tolerancias geométricas dimensionales no solo representa un indicador técnico, sino también un elemento clave para garantizar la confiabilidad del producto, la satisfacción del cliente y la sostenibilidad del sistema productivo.

En términos integrales, la discusión permite establecer que la capacidad de procesos debe entenderse como un sistema articulado que involucra control estadístico, metrología,

definición de tolerancias y gestión organizacional. La interacción entre estos componentes explica las diferencias observadas entre procesos capaces y no capaces, así como la incidencia de las desviaciones geométricas en el desempeño funcional del producto. En consecuencia, los resultados refuerzan la necesidad de adoptar un enfoque sistémico en la gestión de la calidad industrial, donde el análisis estadístico se complementa con estrategias de mejora continua y con una adecuada definición de especificaciones técnicas.

## Conclusiones

La evaluación de la capacidad de procesos permitió establecer que la conformidad con tolerancias geométricas dimensionales no depende exclusivamente de la reducción de la variabilidad, sino también del adecuado centrado del proceso respecto a los límites de especificación. En este sentido, la interpretación conjunta de los índices Cp y Cpk resultó fundamental para determinar la aptitud real del sistema productivo, evidenciando que un proceso puede presentar una dispersión aceptable y, aun así, generar no conformidades cuando su media se encuentra desalineada.

En cuanto al análisis de las variables geométricas, se evidenció que el cumplimiento de dimensiones nominales no garantiza por sí mismo la funcionalidad del producto. Las desviaciones en características como la concentricidad y la planitud demostraron que el control geométrico es indispensable para asegurar el correcto ensamblaje y desempeño de los componentes, lo que confirma la necesidad de integrar criterios dimensionales y geométricos dentro de la gestión de la calidad.

En relación con el uso de herramientas estadísticas avanzadas, se comprobó que la aplicación de métodos de monitoreo continuo permitió identificar desviaciones progresivas en el comportamiento del proceso que no eran detectables mediante enfoques tradicionales. Este resultado pone de manifiesto que la mejora de la capacidad de procesos requiere un enfoque sistémico que articule estabilidad estadística, confiabilidad metrológica y una adecuada correspondencia entre las especificaciones técnicas y las capacidades reales de manufactura.

## Referencias bibliográficas

Aparicio Pico, L. E., Devia Lozano, P., & Amaya Marroquín, O. J. (2022). Aplicación de Deep Learning para la identificación de defectos superficiales utilizados en control de calidad de manufactura y producción industrial: una revisión de la literatura. *Ingeniería*, 28(1), e18934. doi:10.14483/23448393.18934.

ASME. (2018). Y14.5 Dimensioning and Tolerancing. The American Society of Mechanical Engineers.

Chiñas-Sánchez, P., Vázquez-Cervantes, A., & otros autores. (2014). Reconocimiento de variables multivariantes empleando el estadístico  $T^2$  Hotelling y MEWMA mediante las RNA's. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 15(1), 125–138.

Díaz Muñoz, G. A. (2021). La calidad como herramienta estratégica para la gestión empresarial. *Podium*, (39), 19–36. doi:10.31095/podium.2021.39.2.

Herrera, M. M., Robles Parra, J. M., & Preciado Rodríguez, J. M. (2023). Sistemas integrados de gestión de la calidad: estrategia para la competitividad en la agroindustria alimentaria. *Entre Ciencia e Ingeniería*, 17(34), 50–58. doi:10.31908/19098367.2942.

ISO. (2010). ISO 286-2:2010. Geometrical product specifications (GPS) — ISO code system for tolerances on linear sizes — Part 2: Tables of standard tolerance classes and limit deviations for holes and shafts.

ISO. (2011). ISO 8015:2011. Geometrical product specifications (GPS) — Fundamentals — Concepts, principles and rules.

ISO. (2017). ISO 1101:2017. Geometrical product specifications (GPS) — Geometrical tolerancing — Tolerances of form, orientation, location and run-out.

ISO. (2017). ISO 14253-1:2017. Geometrical product specifications (GPS) — Inspection by measurement of workpieces and measuring equipment — Part 1: Decision rules for verifying conformity or nonconformity with specifications.

ISO. (2021). ISO 22514-7:2021. Statistical methods in process management — Capability and performance — Part 7: Capability of measurement processes.

ISO. (2024). ISO 5459:2024. Geometrical product specifications (GPS) — Geometrical tolerancing — Datums and datum systems.

Jiménez, K. V. (2021). Control estadístico de procesos en la fabricación de varillas de acero. *Matemática*, 19(1).

López-López, D. C., Preciado Rodríguez, J. M., Robles Parra, J. M., & Terán Samaniego, K. (2023). La calidad como conducta estratégica para la competitividad de las organizaciones: una revisión bibliográfica. *Entre Ciencia e Ingeniería*, 17(34), 23–35. doi:10.31908/19098367.2849.

Michaloski, J., Frechette, S., & coautores. (2016). End-to-End Quality Information Framework (QIF) Technology Survey. NIST Interagency/Internal Report 8127.

Morocho Ríos, C. J., Zambrano Ortiz, D. J., & Hernández Nariño, A. (2023). Estandarización de los procesos de producción de ropa industrial en la ciudad de Pelileo, Ecuador como factor para incidir en la productividad. *Ingeniería Industrial*, (44), 15–35. doi:10.26439/ing.ind2023.n44.6142.

Portuondo-Paisan, Y., Lafargue-Pérez, F., Pino-Tarragó, J. C., & González-Danger, A. H. (2023). Implementación del análisis de capacidad de procesos en la fabricación de calibres. *Ingeniería Mecánica*, 26(3), e685.

Ramírez Pérez, J. F., López Torres, V. G., Hernández Castillo, S. A., & Morejón Valdés, M. (2021). Lean Six Sigma e Industria 4.0, una revisión desde la administración de operaciones para la mejora continua de las organizaciones. *UNESUM-Ciencias. Revista Científica Multidisciplinaria*, 5(4), 151–168. doi:10.47230/unesum-ciencias.v5.n4.2021.584.

Sierra-Parada, M., Madriz-Rodríguez, D. A., Castillo-Matheus, M. E., Coronel-Villalobos, P. A., & Chacín-Betancourt, J. C. (2022). Estrategias para la mejora de la productividad, la calidad y competitividad en las empresas del sector confección en el Estado Táchira, Venezuela. *AiBi Revista de Investigación, Administración e Ingeniería*, 10(3), 77–86. doi:10.15649/2346030X.3112.

Suárez Castro, R. M., & Ladino Vega, I. D. (2023). Redes neuronales aplicadas al control estadístico de procesos con cartas de control EWMA. *Tecnura*, 27(75), 72–88. doi:10.14483/22487638.18623.

Uribe-Posada, I. C., & Delgado-Trejos, E. (2024). Soft metrología en analítica de datos e inteligencia artificial para la gestión de calidad manufacturera. *SIGNOS, Investigación en Sistemas de Gestión*, 16(2), 259–273. doi:10.15332/24631140.10087.

Zamarrón, A. M. C., López, A. F., & coautores. (2012). Monitoreo y control de un proceso normal multivariado. *Scientia et Technica*, 17(52), 42–47.

Zhao, F., Kramer, T., Horst, J., Rippey, W., & Brown, R. (2012). Quality Information Framework – Integrating Metrology Processes. 14th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing (INCOM).

**Conflicto de intereses:**

Los autores declaran que no existe conflicto de interés