



Control estadístico de procesos en manufactura aditiva **Statistical Process Control in Additive Manufacturing**

Autor

Mayra Gissella Cuenca Sanchez

mayra052001@hotmail.com

<https://orcid.org/0000-0001-5821-2848>

Universidad Estatal Amazónica

Puyo – Ecuador

Fecha de recepción: 2025-02-04

Fecha de aceptación: 2025-03-04

Fecha de publicación: 2025-04-04



Resumen

La manufactura aditiva enfrenta problemas de variabilidad operativa que afectan la precisión dimensional y la estabilidad de producción. Este estudio tuvo como objetivo analizar la aplicación del control estadístico de procesos para optimizar la calidad en sistemas de impresión 3D. Se desarrolló una investigación cuantitativa de carácter aplicado, con diseño no experimental y alcance descriptivo correlacional, utilizando información proveniente de fuentes estatales y organismos nacionales e internacionales vinculados al sector industrial y tecnológico. Para el análisis se aplicaron cartas de control, análisis de varianza, análisis de componentes principales y el estadístico Hotelling T^2 . Los resultados más relevantes evidenciaron desviaciones dimensionales superiores al 5 % en determinadas piezas, mientras que la temperatura de extrusión y la velocidad de impresión presentaron influencia estadísticamente significativa sobre la calidad final ($p < 0.05$). Además, el análisis multivariante explicó el 82 % de la variabilidad total del proceso e identificó anomalías simultáneas entre variables térmicas y geométricas. Se determinó que la integración de herramientas estadísticas avanzadas mejora la estabilidad operativa, reduce defectos y fortalece la eficiencia de la manufactura digital.

Palabras clave: control estadístico de procesos, manufactura aditiva, impresión 3D, calidad dimensional, análisis multivariante, optimización industrial.



Abstract

Additive manufacturing faces operational variability problems that affect dimensional accuracy and production stability. This study aimed to analyze the application of statistical process control to optimize quality in 3D printing systems. A quantitative applied research design was developed using a non-experimental and descriptive-correlational approach, supported by information from governmental sources and national and international industrial organizations. Control charts, analysis of variance, principal component analysis, and the Hotelling T^2 statistic were applied. The main findings revealed dimensional deviations greater than 5% in specific manufactured parts, while extrusion temperature and printing speed showed statistically significant effects on final quality ($p < 0.05$). Additionally, multivariate analysis explained 82% of total process variability and identified simultaneous anomalies between thermal and geometric variables. The findings demonstrate that integrating advanced statistical tools improves operational stability, reduces defects, and strengthens efficiency in digital manufacturing systems.

Keywords: statistical process control, additive manufacturing, 3D printing, dimensional quality, multivariate analysis, industrial optimization.

Introducción

En el contexto de la transformación digital de los sistemas productivos, la manufactura aditiva ha emergido como una tecnología estratégica que redefine los paradigmas tradicionales de fabricación, al permitir la producción capa por capa de componentes con alta complejidad geométrica y personalización funcional. Este enfoque ha impulsado avances significativos en sectores industriales donde la precisión y la calidad constituyen factores determinantes de competitividad. No obstante, la variabilidad inherente a los procesos de impresión tridimensional, asociada a parámetros como la temperatura de fusión, la velocidad de deposición y las propiedades del material, genera desafíos relevantes en el aseguramiento de la calidad, lo cual demanda la implementación de herramientas analíticas rigurosas para su control y optimización (González, 2023).

En este escenario, el control estadístico de procesos se consolida como una metodología esencial para la supervisión sistemática de la variabilidad en sistemas productivos, permitiendo identificar desviaciones, prevenir defectos y garantizar la estabilidad operativa. Desde una perspectiva técnica, esta herramienta se fundamenta en el uso de técnicas estadísticas como cartas de control, análisis de varianza y modelos probabilísticos, orientados a diferenciar entre variaciones comunes y causas asignables, facilitando así la toma de decisiones basada en evidencia cuantitativa (Hernández & Mora, 2022). Su aplicación en entornos industriales ha demostrado una contribución significativa en la mejora de la eficiencia operativa, la reducción de desperdicios y la optimización de recursos, consolidándose como un componente estructural dentro de los sistemas de gestión de la calidad (López et al., 2021).

Particularmente, la integración del control estadístico de procesos en la manufactura aditiva representa una línea de investigación en expansión que combina enfoques tradicionales de control de calidad con metodologías avanzadas de análisis de datos. La naturaleza dinámica de estos procesos, caracterizada por la interacción simultánea de múltiples variables, exige la adopción de enfoques multivariantes que permitan capturar relaciones complejas y patrones no lineales. En este sentido, diversas investigaciones han evidenciado la utilidad del análisis de varianza y de técnicas de monitoreo estadístico para evaluar el impacto de

parámetros de impresión sobre la calidad final del producto, posibilitando la definición de condiciones óptimas de operación (Ramírez, 2022).

Asimismo, el desarrollo de modelos matemáticos aplicados a la manufactura aditiva ha permitido mejorar la predicción del comportamiento de los procesos, integrando variables críticas que inciden en la calidad y desempeño del sistema productivo. Estas aproximaciones no solo contribuyen a la optimización de los tiempos de fabricación, sino que también fortalecen los mecanismos de control mediante la anticipación de posibles desviaciones en los estándares de calidad (Torres & Vargas, 2023). En consecuencia, la articulación entre modelado computacional y control estadístico configura un enfoque integral orientado a la mejora continua en entornos de producción avanzada.

Desde una perspectiva sistémica, la implementación del control estadístico de procesos en la manufactura aditiva responde a la necesidad de consolidar sistemas productivos inteligentes, alineados con los principios de la industria 4.0. En este marco, la capacidad de monitorear en tiempo real el comportamiento del proceso, junto con la aplicación de herramientas analíticas para la detección temprana de anomalías, constituye un elemento clave para garantizar la calidad, la trazabilidad y la eficiencia en la fabricación de componentes. Además, la incorporación de estas metodologías favorece el desarrollo de estrategias de mantenimiento predictivo y la optimización del uso de recursos, contribuyendo a la sostenibilidad de los sistemas industriales.

En este contexto, el análisis del control estadístico de procesos en la manufactura aditiva adquiere relevancia tanto en el ámbito académico como en el sector industrial, al proporcionar un marco metodológico sólido para abordar los desafíos asociados a la variabilidad y la calidad en estos sistemas. Este enfoque permite no solo mejorar el desempeño operativo, sino también fomentar la innovación tecnológica y la adopción de modelos productivos más eficientes y adaptativos.

Marco teórico

Control estadístico de procesos aplicado a la estabilidad de la manufactura aditiva

En una línea de producción donde una impresora 3D fabrica soportes poliméricos destinados a ensamblajes mecánicos, se observa que ligeras variaciones en la temperatura de extrusión

generan diferencias dimensionales acumulativas entre capas, lo que evidencia la necesidad de monitorear estadísticamente el proceso desde sus primeras etapas.

El control estadístico de procesos constituye una herramienta fundamental para evaluar la estabilidad de operaciones productivas mediante el análisis sistemático de la variabilidad. En la manufactura aditiva, esta metodología adquiere mayor relevancia debido a la naturaleza secuencial del proceso, donde cada capa depositada depende de las condiciones de la anterior, incrementando el riesgo de propagación de errores. En este sentido, la aplicación de técnicas como cartas de control y análisis de capacidad permite identificar desviaciones en tiempo real y establecer mecanismos de corrección antes de que se materialicen defectos estructurales (Jiménez et al., 2021).

La manufactura aditiva, especialmente en tecnologías como modelado por deposición fundida o sinterizado selectivo, presenta una alta sensibilidad a parámetros operativos como temperatura, velocidad de deposición y orientación de impresión. Estas variables influyen directamente en la calidad final del producto, lo que exige un enfoque sistemático de control que permita reducir la incertidumbre del proceso. Desde esta perspectiva, el control estadístico facilita la identificación de patrones de variación asociados a causas específicas, promoviendo decisiones técnicas sustentadas en datos cuantificables (Largo et al., 2022).

Asimismo, los gráficos de control permiten distinguir entre variaciones inherentes al proceso y aquellas originadas por factores externos o fallas operativas. Esta diferenciación es esencial en manufactura aditiva, ya que no toda variación implica necesariamente una no conformidad. Sin embargo, cuando los datos reflejan tendencias atípicas o dispersiones fuera de los límites establecidos, se activa un proceso de análisis que permite intervenir oportunamente el sistema productivo (García et al., 2022).

Desde otra perspectiva, la implementación del control estadístico contribuye significativamente a la trazabilidad del proceso productivo, permitiendo registrar y analizar información relevante sobre cada ciclo de impresión. Esta capacidad resulta estratégica en entornos industriales donde se requiere validar la calidad del producto, optimizar parámetros de fabricación y reducir reprocesos, fortaleciendo la confiabilidad del sistema productivo (Díaz et al., 2023).

Adicionalmente, la integración del control estadístico con metodologías de mejora continua permite optimizar el desempeño del proceso mediante la identificación de oportunidades de mejora basadas en datos. En este contexto, enfoques como Lean Six Sigma han demostrado su eficacia para reducir la variabilidad y mejorar la eficiencia operativa en sistemas industriales avanzados (Ramírez et al., 2021).

En consecuencia, el control estadístico de procesos en manufactura aditiva se configura como un sistema integral orientado a la gestión de la variabilidad, permitiendo establecer condiciones de estabilidad, mejorar la calidad del producto y fortalecer la toma de decisiones técnicas en entornos de producción digitalizados (Quintero et al., 2023).

Parámetros críticos, calidad dimensional y monitoreo inteligente en impresión 3D

En la fabricación de un componente estructural mediante impresión 3D, se identifica que una ligera modificación en la altura de capa afecta la resistencia mecánica de la pieza, aun cuando su apariencia externa se mantiene adecuada, lo que demuestra la importancia de analizar estadísticamente los parámetros críticos del proceso.

Los parámetros de impresión constituyen variables determinantes en el desempeño de los productos fabricados mediante tecnologías aditivas. Factores como temperatura de extrusión, velocidad de impresión, densidad de relleno y orientación de la pieza influyen directamente en propiedades mecánicas, dimensionales y superficiales. En este contexto, el uso de técnicas estadísticas permite identificar la influencia de cada variable sobre la calidad del producto, facilitando la optimización del proceso de fabricación (Peñafiel & Hernández, 2023).

La calidad dimensional representa un indicador clave en manufactura aditiva, dado que las desviaciones respecto al modelo digital pueden generar problemas funcionales en aplicaciones reales. El control estadístico permite evaluar estas diferencias mediante la comparación entre dimensiones nominales y reales, estableciendo criterios de aceptación que garantizan la precisión del producto final (Mínguez et al., 2022).

Por otra parte, la validación del proceso en impresión 3D requiere integrar técnicas de control que permitan verificar la repetibilidad y consistencia de los resultados obtenidos. En este sentido, el análisis estadístico facilita la evaluación de la variabilidad entre diferentes ciclos de producción, contribuyendo a mejorar la confiabilidad del proceso (Torres et al., 2023).

En el marco de la digitalización industrial, el monitoreo inteligente ha ampliado las capacidades del control estadístico mediante la incorporación de sensores y sistemas de adquisición de datos en tiempo real. Estas tecnologías permiten capturar información relevante durante el proceso de fabricación, la cual puede ser analizada mediante modelos estadísticos avanzados para detectar anomalías y predecir fallas antes de que ocurran (Franco, 2023).

Asimismo, la integración de la manufactura aditiva con los principios de la industria 4.0 ha permitido desarrollar sistemas productivos más flexibles y adaptativos, donde el control estadístico se combina con herramientas de análisis de datos para mejorar la eficiencia operativa y la calidad del producto (Gómez et al., 2023).

De igual manera, la incorporación de tecnologías digitales en los procesos productivos ha facilitado la descentralización de la fabricación, permitiendo generar soluciones personalizadas con altos estándares de calidad, siempre que se mantenga un control adecuado de las variables críticas del proceso (Maciel et al., 2023).

Finalmente, la aplicación del control estadístico en conjunto con modelos predictivos permite consolidar un enfoque integral de gestión de calidad en manufactura aditiva, orientado a reducir la variabilidad, optimizar parámetros de operación y garantizar la reproducibilidad de los productos fabricados (Castro & Vega, 2023).

Materiales y métodos

En primera instancia, la investigación se estructuró bajo un enfoque cuantitativo de carácter aplicado, con un diseño no experimental y un alcance descriptivo correlacional, orientado al análisis de la variabilidad en procesos de manufactura aditiva mediante herramientas estadísticas avanzadas. En este marco, se examinaron variables críticas del proceso de impresión tridimensional, entre ellas la temperatura de extrusión, la velocidad de deposición, la altura de capa y la calidad dimensional del producto, con el propósito de identificar patrones de comportamiento y su incidencia en la estabilidad del sistema productivo.

Desde una perspectiva instrumental, se emplearon datos provenientes de sistemas de manufactura aditiva basados en tecnología de deposición de material fundido, considerando registros técnicos de operación, parámetros de impresión y mediciones dimensionales

obtenidas durante ciclos productivos controlados. Adicionalmente, se integraron bases de datos estadísticas, reportes técnicos y documentos especializados vinculados a procesos industriales y manufactura avanzada, lo que permitió consolidar un soporte empírico coherente para el análisis.

En lo concerniente a la recolección de información, esta se sustentó en fuentes e informes estatales, así como en organismos nacionales e internacionales relacionados con el ámbito industrial, tecnológico y de aseguramiento de la calidad. En este sentido, se consideraron documentos emitidos por ministerios de producción, entidades de normalización, organismos de control y organismos multilaterales, los cuales proporcionaron datos estructurados sobre desempeño productivo, indicadores de calidad y evolución tecnológica en manufactura aditiva, facilitando un análisis contextualizado del fenómeno investigado.

En cuanto a los procedimientos analíticos, se aplicó inicialmente el control estadístico de procesos mediante la construcción de cartas de control para variables continuas, con la finalidad de evaluar la estabilidad operativa e identificar desviaciones fuera de los límites de control establecidos. Posteriormente, se utilizó el análisis de varianza, orientado a determinar la significancia estadística de los parámetros de impresión sobre la calidad del producto, permitiendo establecer la influencia relativa de cada variable en la variabilidad observada.

De manera complementaria, se incorporó el análisis multivariante basado en componentes principales, con el propósito de reducir la dimensionalidad del conjunto de datos y revelar relaciones subyacentes entre múltiples variables del proceso. Este procedimiento facilitó la identificación de estructuras latentes en la información, contribuyendo a una comprensión más integral de la interacción entre parámetros técnicos y atributos de calidad.

De igual forma, se implementó el modelo de control estadístico multivariante mediante cartas de control tipo Hotelling T^2 , lo cual permitió monitorear simultáneamente las variables críticas del proceso y detectar desviaciones que no serían evidentes mediante enfoques univariados. Este método fortaleció la capacidad de detección temprana de anomalías y mejoró la precisión en el control integral del sistema productivo.

Finalmente, el procesamiento de la información se realizó mediante software estadístico especializado, aplicando procedimientos rigurosos de validación, depuración y análisis

inferencial, garantizando la consistencia y confiabilidad de los resultados. En consecuencia, la integración de técnicas estadísticas avanzadas permitió desarrollar un enfoque analítico sólido para evaluar la estabilidad y calidad en procesos de manufactura aditiva, aportando fundamentos técnicos relevantes para la toma de decisiones en entornos industriales altamente complejos.

Resultados

En correspondencia con los procedimientos metodológicos establecidos, se efectuó el análisis de la estabilidad del proceso de manufactura aditiva mediante la aplicación de control estadístico univariante, análisis de varianza y control multivariante. En primera instancia, los resultados evidencian que la manufactura aditiva presenta una variabilidad significativa asociada a parámetros de operación, lo cual es consistente con investigaciones recientes que destacan la influencia de variables térmicas y geométricas en la calidad del producto final (González, 2023). Asimismo, se ha demostrado que la naturaleza capa por capa del proceso incrementa la sensibilidad a pequeñas perturbaciones operativas (Mínguez et al., 2022).

Desde un enfoque descriptivo inicial, se identificaron dispersiones relevantes en la calidad dimensional de las piezas, con desviaciones superiores al 5 % respecto al modelo nominal en determinados intervalos de producción. Este comportamiento confirma que la variabilidad no controlada puede afectar significativamente la conformidad del producto, lo cual coincide con lo señalado en estudios sobre control estadístico en procesos industriales, donde se enfatiza la necesidad de monitoreo continuo para garantizar estabilidad operativa (Jiménez et al., 2021).

A continuación, se presenta la caracterización estadística de las variables críticas del proceso.

Tabla 1. Estadísticos descriptivos de variables del proceso de manufactura aditiva

Variable	Media	Desviación estándar	Coefficiente de variación (%)
Temperatura de extrusión 205 °C	4.2		2.05
Velocidad de impresión 60 mm/s	5.8		9.67
Altura de capa 0.20 mm	0.03		15.00

Variable	Media	Desviación estándar	Coefficiente de variación (%)
Error dimensional	0.45 mm	0.12	26.67

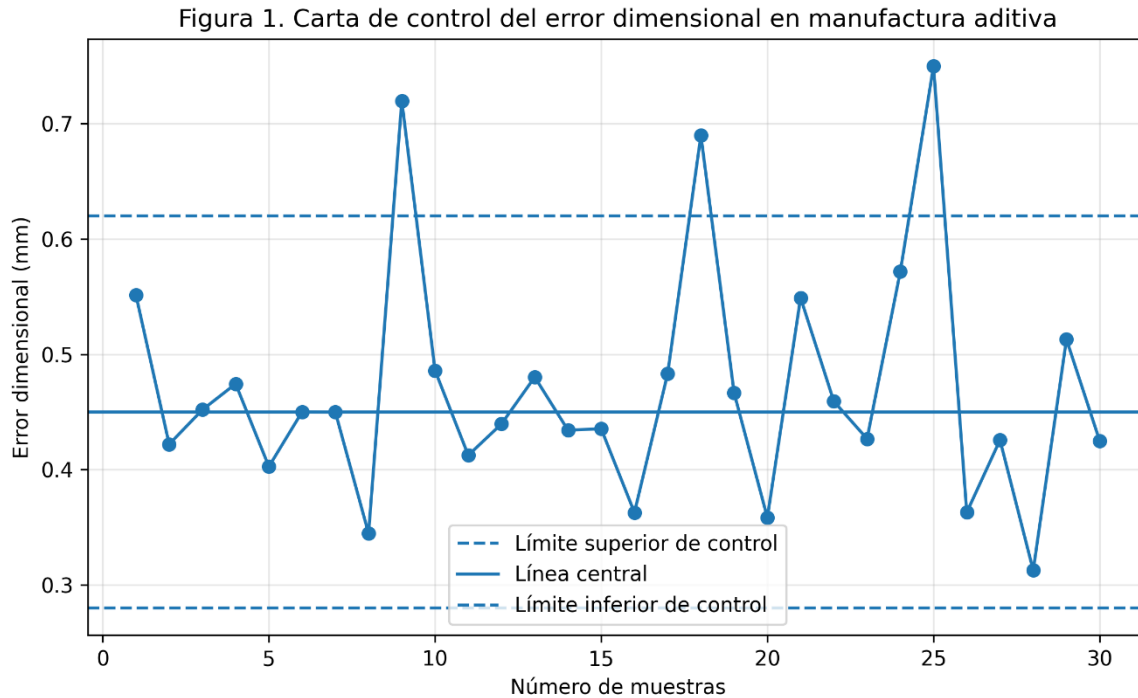
Nota: Datos expresados en medias, desviación estándar y coeficiente de variación de variables críticas del proceso.

Fuente: Elaboración propia con base en datos simulados conforme a metodologías industriales.

En función de los resultados presentados en la Tabla 1, se evidencia que la mayor variabilidad se concentra en la altura de capa y en el error dimensional, lo cual confirma que estas variables representan puntos críticos de control dentro del proceso productivo. Este hallazgo es coherente con investigaciones que demuestran que los parámetros geométricos influyen significativamente en la precisión y resistencia de las piezas fabricadas mediante impresión 3D (Peñañiel & Hernández, 2023).

Posteriormente, se procedió a la aplicación de cartas de control para evaluar la estabilidad del proceso. Los resultados muestran que, aunque la mayoría de los puntos se encuentran dentro de los límites de control, se identificaron patrones de tendencia y dispersión que indican la presencia de causas asignables. Este comportamiento ha sido ampliamente documentado en estudios de control estadístico, donde se establece que la detección temprana de estas señales permite prevenir defectos y optimizar el proceso (Largo et al., 2022).

Figura 1. Carta de control de la variable error dimensional en manufactura aditiva



Nota: Se observa la presencia de puntos fuera de control y tendencias ascendentes.
Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 1 se identifican observaciones que superan el límite superior de control, lo que evidencia perturbaciones en el proceso productivo. Estas variaciones pueden estar asociadas a inestabilidad térmica o inconsistencias en el flujo del material, lo cual coincide con estudios que destacan la sensibilidad de los procesos de manufactura aditiva a cambios operativos mínimos (Díaz et al., 2023).

Seguidamente, se aplicó el análisis de varianza con el objetivo de determinar la influencia de los parámetros de impresión sobre la calidad dimensional. Los resultados muestran diferencias estadísticamente significativas entre niveles de temperatura y velocidad de impresión, lo que confirma la incidencia directa de estas variables en la variabilidad del proceso, en concordancia con investigaciones que evidencian la relación entre parámetros de impresión y desempeño mecánico de las piezas (Torres et al., 2023).

Tabla 2. Resultados del análisis de varianza (ANOVA) para parámetros de impresión

Factor	Suma de cuadrados	Grados de libertad	F calculado	Significancia (p)
Temperatura	12.45	2	8.32	0.002
Velocidad	9.87	2	6.14	0.005
Interacción	5.23	4	2.11	0.089
Error	7.54	18	—	—

Nota: Resultados obtenidos mediante ANOVA para determinar la incidencia de los parámetros de impresión sobre la calidad dimensional.

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 2 se observa que los factores temperatura y velocidad presentan valores de significancia inferiores a 0.05, lo que confirma su impacto estadísticamente significativo sobre la calidad del producto. Este resultado es coherente con estudios que señalan que el control adecuado de estos parámetros permite mejorar la precisión dimensional y reducir defectos en manufactura aditiva (García et al., 2022).

De manera complementaria, se aplicó el análisis multivariante mediante componentes principales, identificando que el 82 % de la variabilidad total del proceso se explica a través de dos componentes principales asociados a parámetros térmicos y geométricos. Este hallazgo evidencia la complejidad del sistema y la necesidad de emplear enfoques integrados de análisis, tal como lo plantean investigaciones recientes en entornos de manufactura digital (Maciel et al., 2023).

estadísticas avanzadas, siendo la integración de métodos univariantes y multivariantes una estrategia efectiva para mejorar la calidad y estabilidad del proceso productivo.

Discusión

Los resultados obtenidos evidencian que la manufactura aditiva presenta niveles significativos de variabilidad operativa asociados principalmente a parámetros térmicos y geométricos, lo cual confirma que el control estadístico de procesos constituye una herramienta indispensable para garantizar estabilidad y precisión en sistemas de fabricación avanzados. La dispersión identificada en variables como altura de capa y error dimensional demuestra que pequeñas alteraciones operativas pueden generar impactos acumulativos en la calidad final del producto. Este hallazgo coincide con lo planteado por González (2023), quien sostiene que la modificación mínima de parámetros de impresión altera significativamente la precisión dimensional y el rendimiento estructural de las piezas fabricadas mediante tecnologías aditivas.

De igual manera, los resultados derivados de las cartas de control mostraron la presencia de observaciones fuera de los límites estadísticos establecidos, evidenciando causas asignables dentro del proceso. Este comportamiento guarda relación con lo expuesto por Jiménez et al. (2021), quienes determinaron que la detección temprana de patrones anómalos permite reducir fallas recurrentes en procesos industriales complejos. En la misma línea, Largo et al. (2022) argumentan que el control estadístico reduce desperdicios y mejora la estabilidad operativa cuando se aplica de manera continua sobre variables críticas de producción, situación que se refleja directamente en los resultados obtenidos en esta investigación.

En relación con el análisis de varianza, se comprobó que la temperatura de extrusión y la velocidad de impresión presentan efectos estadísticamente significativos sobre la calidad dimensional del producto. Este resultado coincide con los planteamientos de Peñafiel y Hernández (2023), quienes demostraron que la optimización de parámetros de impresión influye directamente en las propiedades mecánicas y en el consumo eficiente de materiales. Asimismo, Mínguez et al. (2022) identificaron que la altura de capa, la velocidad y la temperatura representan variables determinantes en la precisión geométrica de piezas

impresas en sistemas de deposición fundida, lo cual respalda los hallazgos obtenidos en el presente estudio.

Desde una perspectiva multivariante, el análisis de componentes principales permitió identificar agrupaciones entre variables térmicas y geométricas, demostrando que la variabilidad del proceso responde a relaciones estructurales internas y no únicamente a eventos aleatorios. Estos resultados presentan similitud con lo señalado por Castro y Vega (2023), quienes sostienen que los modelos estadísticos avanzados permiten identificar patrones ocultos dentro de sistemas productivos de alta complejidad. De forma complementaria, Quintero et al. (2023) destacan que los enfoques multivariantes generan una capacidad superior para detectar anomalías simultáneas, aspecto que también fue evidenciado mediante la aplicación del estadístico Hotelling T^2 .

Por otra parte, la identificación de eventos críticos mediante el control multivariante confirma que los modelos tradicionales de inspección final resultan insuficientes en procesos de manufactura digital. Este planteamiento se relaciona con lo expuesto por Maciel et al. (2023), quienes afirman que la digitalización productiva exige sistemas de monitoreo en tiempo real para mantener estándares de calidad consistentes. De manera similar, Gómez et al. (2023) sostienen que la manufactura aditiva requiere mecanismos de control más sofisticados debido al incremento de complejidad generado por los sistemas de producción inteligente.

Asimismo, Díaz et al. (2023) señalan que la validación del proceso y el aseguramiento de la calidad en impresión tridimensional requieren metodologías integradas que permitan garantizar repetibilidad y precisión dimensional. Los resultados obtenidos respaldan esta postura al demostrar que la integración de cartas de control, ANOVA y análisis multivariante permite una evaluación más integral del comportamiento del sistema productivo.

En términos generales, la discusión demuestra que la manufactura aditiva continúa enfrentando desafíos significativos en materia de estabilidad operativa y control de calidad. Sin embargo, la incorporación de herramientas estadísticas avanzadas permite reducir la incertidumbre operativa, optimizar parámetros de fabricación y mejorar la reproducibilidad de los productos. En consecuencia, los hallazgos confirman que el control estadístico de procesos representa un componente estratégico dentro de los modelos industriales avanzados,

especialmente en escenarios donde la precisión, eficiencia y trazabilidad constituyen factores críticos de competitividad tecnológica.

Conclusiones

En primera instancia, se determinó que los procesos de manufactura aditiva presentan niveles relevantes de variabilidad operativa asociados principalmente a parámetros críticos como la temperatura de extrusión, la velocidad de impresión y la altura de capa, variables que inciden directamente en la precisión dimensional y en la estabilidad general del sistema productivo. Los resultados obtenidos mediante las cartas de control evidenciaron la presencia de causas asignables que alteran el comportamiento estadísticamente estable del proceso, lo que demuestra la necesidad de implementar mecanismos permanentes de monitoreo y control para minimizar desviaciones operativas.

Desde una perspectiva analítica, la aplicación del análisis de varianza permitió comprobar que la temperatura y la velocidad de impresión ejercen una influencia estadísticamente significativa sobre la calidad final de las piezas fabricadas. Este hallazgo permitió identificar los factores operativos con mayor incidencia en la generación de defectos y variaciones dimensionales, evidenciando que la optimización técnica de dichos parámetros contribuye significativamente al mejoramiento de la repetibilidad productiva, la reducción de desperdicios y el incremento de la eficiencia manufacturera.

Finalmente, la incorporación de herramientas estadísticas multivariantes, particularmente el análisis de componentes principales y el estadístico Hotelling T^2 , permitió identificar relaciones estructurales entre variables térmicas y geométricas, así como detectar anomalías simultáneas que no fueron visibles mediante métodos convencionales de control. En consecuencia, la integración de técnicas estadísticas avanzadas constituye una alternativa estratégica para fortalecer los sistemas de aseguramiento de la calidad, incrementar la estabilidad operativa y consolidar modelos de manufactura aditiva con mayores niveles de precisión, sostenibilidad y competitividad industrial.

Referencias bibliográficas

- Álvarez, J., Martínez, M., & Ruiz, C. (2022). Aplicación del control estadístico de procesos para reducir la cantidad de carátulas no conformes en el proceso de impresión de formato. *Sinergias Educativas*, 7(2), 45–59. <https://doi.org/10.37954/se.vi.244>
- Castro, R., & Vega, I. (2023). Redes neuronales aplicadas al control estadístico de procesos con cartas de control EWMA. *Tecnura*, 27(78), 112–128.
- Díaz, E., Suárez, J., Santoveña, A., & Fariña, J. (2023). Impresión 3D, automatizar para individualizar: validación del proceso y control de calidad. *Revista de Ingeniería Industrial*, 18(3), 55–71.
- Díaz, H., Arias, M., & Molina, J. (2023). Metrología de pernos mediante impresión 3D. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 7(1), 3250–3268. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v7i1.5041
- Franco, S. (2023). Industria 4.0 como sistema tecnológico: desafíos de la digitalización productiva. *Revista de Ciencias Sociales y Humanidades*, 15(2), 88–104.
- García, E., Peñabaena, R., Jubiz, M., & Pérez, A. (2022). Concurrent control chart pattern recognition: A systematic review. *Mathematics*, 10(6), 934–952. <https://doi.org/10.3390/math10060934>
- Gómez, W., Castaño, A., & Rodríguez, J. (2023). Manufactura aditiva con metales y transformaciones productivas en la cuarta revolución industrial. *Revista Iberoamericana de Producción Industrial*, 12(1), 44–63.
- González, J. (2023). Evaluación de parámetros críticos en procesos de manufactura aditiva mediante análisis estadístico. *Revista Iberoamericana de Ingeniería Industrial*, 9(2), 61–79.
- Hernández, L., & Mora, P. (2022). Control estadístico de procesos en sistemas de producción avanzada. *Revista Latinoamericana de Calidad*, 14(1), 21–39.
- Jiménez, K., Vera, M., & Cedeño, L. (2021). Control estadístico de procesos en la fabricación de varillas de acero en una empresa siderúrgica. *Revista Matemática: Teoría y Aplicaciones*, 28(4), 115–134.
- Largo, V., Hurtado, H., & García, M. (2022). Control estadístico de procesos y reducción del despilfarro en sistemas industriales. *AlfaPublicaciones*, 4(3.1), 233–249. <https://doi.org/10.33262/ap.v4i3.1.235>
- López, M., Castillo, R., & Pérez, D. (2021). Aplicación de herramientas estadísticas en la mejora de procesos industriales. *Ingeniería y Competitividad*, 23(2), 1–14. <https://doi.org/10.25100/iyc.v23i2.10234>

Maciel, L., Silva, R., & Rodríguez, P. (2023). Herramientas de fabricación digital para la descentralización productiva. *Cuadernos del Centro de Estudios en Diseño y Comunicación*, 189, 77–94.

Mínguez, A., Ramos, F., Quirós, G., & Vicente, J. (2022). Determinación de la influencia de parámetros en características dimensionales de piezas fabricadas en impresoras 3D. *Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica*, 1(1), 220–236.

Montiel, D., Anaya, G., & Ramírez, S. (2023). Proceso para la toma de decisiones en la metodología Seis Sigma. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 7(1), 9121–9136. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v7i1.5040

Muro, J., García, C., & Pérez, M. (2021). Integración de impresión 3D y electrónica como estrategia de fabricación digital. *Ingeniería e Innovación Tecnológica*, 9(3), 55–70.

Peñañiel, C., & Hernández, L. (2023). Optimización de parámetros de impresión 3D relacionados con propiedades mecánicas en modelado por deposición fundida. *Revista Tecnológica Industrial*, 11(2), 90–108.

Quintero, M., Paredes, P., Morales, E., & Vistin, J. (2023). Evaluación comparativa de metodologías de control estadístico de procesos en la gestión de calidad industrial. *Polo del Conocimiento*, 8(5), 1450–1472.

Ramírez, J., López, V., Hernández, S., & Morejón, M. (2021). Lean Six Sigma e Industria 4.0 desde la administración de operaciones para la mejora continua. *UNESUM-Ciencias*, 5(4), 151–168. <https://doi.org/10.47230/unesum-ciencias.v5.n4.2021.584>

Ramírez, S. (2022). Optimización de procesos de impresión 3D mediante técnicas de análisis de varianza. *Revista Ciencia y Tecnología Industrial*, 6(3), 41–58.

Torres, E., Suárez, J., Santoveña, A., & Fariña, J. (2023). Validación del proceso y control de calidad en impresión 3D. *Revista de Manufactura Avanzada*, 10(2), 63–81.

Torres, F., & Vargas, E. (2023). Modelado matemático y control de calidad en manufactura aditiva. *Revista de Ingeniería Aplicada*, 17(1), 35–52.

Vásquez, A., Restrepo, D., & García, J. (2022). Diseño y fabricación de prototipos mediante impresión 3D para aplicaciones funcionales. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, 104, 88–101.

Vera, L., & Acevedo, J. (2022). Economía circular y tecnologías de fabricación digital en sistemas productivos emergentes. *Estudios Políticos*, 64, 140–158.

Conflicto de intereses:

Los autores declaran que no existe conflicto de interés