

Artículo:

Metodología integrada para estabilizar la calidad en procesos de manufactura

Integrated Methodology for Stabilizing Quality in Manufacturing Processes

José Aparicio-Urbano¹, María Guadalupe De-la-Cruz-Altamirano², Lidya Romero-Ramírez¹, Luis Andrés Legorreta-Lovera¹, Luis-Enrique García-Santamaría^{3*}

Revista Interdisciplinaria de Ingeniería Sustentable y Desarrollo Social

Editada por el **Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Tantoyuca**

Desv. Lindero Tametate, S/N
Col. La Morita
C.P. 92100
Tantoyuca, Veracruz, México.

Correo electrónico:
revistadigital@itsta.edu.mx

Sitio WEB
<https://revista-riisds.mx/>

ISSN [2448-8003](https://doi.org/10.63728/riisds.v12i1.346)

Editor responsable:
Dr. Horacio Bautista Santos

Recibido: **24 de septiembre de 2025**
Aceptado: **14 de diciembre de 2025**
Publicado: **02 de enero de 2026**

Como citar este artículo:

Aparicio-Urbano, J., de la Cruz-Altamirano, M.-G., Romero-Ramírez, L., Legorreta-Lovera, L.-A., & García-Santamaría, L. E. (2026). Metodología integrada para estabilizar la calidad en procesos de manufactura. *Revista Interdisciplinaria De Ingeniería Sustentable Y Desarrollo Social*, 12(1), 1–21.
<https://doi.org/10.63728/riisds.v12i1.346>

Copyright: Este artículo es de acceso abierto distribuido bajo los términos y condiciones de la licencia Creative Commons
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>

¹ Tecnológico Nacional de México – Tecnológico de Estudios Superiores de Jocotitlán, Estado de México, México.

² Tecnológico Nacional de México – Instituto Tecnológico de Orizaba, Veracruz, México.

³ Tecnológico Nacional de México – Instituto Tecnológico Superior de Misantla, Veracruz, México.

* Autor corresponsal: legarcias@itsm.edu.mx

Resumen: Este estudio implementa una estrategia integrada basada en el Análisis de Repetibilidad y Reproducibilidad (R&R), el Análisis de Modo y Efecto de Falla (AMEF) y el Control Estadístico del Proceso (CEP). Se trabajó con tres operadores, diez piezas y dos repeticiones por muestra, aplicando Análisis de Varianza para identificar la magnitud y origen de la inestabilidad. El primer R&R mostró una variabilidad entre piezas de 79.09% y entre operadores del 44.66%, lo que evidenció un sistema inestable. A partir de estos resultados se elaboró un AMEF que permitió priorizar fallas críticas como la acumulación de viruta, el desgaste de herramienta y la falta de calibración del instrumento de medición. La validación se realizó mediante los índices capacidad potencial del proceso (Cp) y centralización del proceso (Cpk), y con el segundo R&R confirmó la efectividad de las mejoras, logrando una variación total menor al 10 %, y Cp y Cpk superiores a 1.33, demostrando un proceso estable y capaz. La metodología R&R–AMEF–CEP se presenta como una estrategia eficaz y replicable para entornos de mecanizado por pedido.

Palabras clave: Proceso de torneado, análisis (R&R), AMEF, variabilidad del torneado, mejora continua.

Abstract

This study implements an integrated strategy based on Gage Repeatability and Reproducibility (R&R), Failure Mode and Effects Analysis (FMEA), and Statistical Process Control (SPC). The experimental work involved three operators, ten workpieces, and two repeated measurements per sample, using Analysis of Variance to identify the magnitude and sources of process instability. The initial R&R study revealed 79.09% part-to-part variability and 44.66% operator-related variability, indicating an unstable measurement and machining system. Based on these results, an FMEA was developed to prioritize critical failure modes such as chip accumulation, tool wear, and inadequate calibration of the measuring instrument. Validation was conducted using the process capability index (C_p) and the process centering index (C_{pk}). The second R&R confirmed the effectiveness of the corrective actions, achieving total measurement system variation below 10% and C_p and C_{pk} values greater than 1.33, demonstrating a stable and capable process. The integrated R&R–FMEA–SPC methodology is presented as an effective and replicable strategy for custom machining environments.

Keywords: Turning operations; Gage R&R; FMEA; process variability; capability analysis; continuous improvement.

Introducción

La empresa INGENIUM, ubicada en el Centro Academia-Industria (CAI) del Tecnológico de Estudios Superiores de Jocotitlán, produce componentes mecanizados bajo pedido. Durante la fabricación de un lote de 600 tornillos de acero inoxidable AISI 410, el cliente rechazó el 80 % de las primeras piezas entregadas al no cumplir las dimensiones especificadas, particularmente en el diámetro de la cuerda. La revisión interna no permitió identificar de inmediato si el origen de las desviaciones se encontraba en el proceso de torneado, en el sistema de medición o en la operación del personal. Esta falta de precisión dificultó establecer acciones correctivas y evidenció la necesidad de validar tanto el proceso como el sistema de medición para recuperar la conformidad del producto.

Esta situación evidenció una deficiencia en el control y la trazabilidad del proceso de manufactura, así como en la validación del sistema de medición utilizado, generando incertidumbre sobre la capacidad del proceso para mantener la conformidad con los

requisitos del cliente. En consecuencia, resultó necesario analizar las fuentes de variación presentes en el sistema de producción y medición, con el propósito de establecer acciones correctivas y de mejora que aseguren la estabilidad del proceso y la confiabilidad del producto. Bajo esta perspectiva, el presente estudio planteó la evaluación de la capacidad del proceso y del sistema de medición, con el fin de identificar las causas raíz de la no conformidad y fortalecer la gestión de calidad en la manufactura de piezas mecanizadas por pedido.

Ante esta problemática, se desarrolló un estudio integral orientado a la optimización del proceso de torneado mediante la aplicación combinada del Análisis de Modo y Efecto de Falla (AMEF) y el estudio de Repetibilidad y Reproducibilidad (R&R), herramientas fundamentales en la gestión de la calidad. De acuerdo con la literatura, El AMEF permitió identificar las fallas críticas y sus causas raíz, cuantificando su impacto mediante el Número de Prioridad de Riesgo (RPN), mientras que el análisis R&R aseguró la precisión y consistencia del sistema de medición, reduciendo la variabilidad entre operadores y equipos (Ghofur & Andesta, 2023; Mazlan et al., 2023).

En manufactura, la variación dimensional puede ser producto de fallas mecánicas, desgaste de herramienta, acumulación de viruta, ausencia de estandarización o errores humanos (). La literatura propone, para enfrentar estas situaciones, el uso combinado del Análisis de Modo y Efecto de Falla (AMEF) y los estudios de Repetibilidad y Reproducibilidad (R&R), ya que tiene la posibilidad de identificar modos de falla, cuantificar su impacto y evaluar la confiabilidad del sistema de medición. Diversos estudios documentan que el AMEF es útil para establecer causas raíz y priorizar riesgos mediante el Número de Prioridad de Riesgo (RPN) (Laurensia & Gozali, 2021; Mazlan et al., 2023), mientras que el análisis R&R contribuye a distinguir si la variación observada proviene del instrumento, de la operación o del proceso mismo (Jiménez et al., 2022). Este enfoque ha mejorado la estabilidad en sistemas CNC, la precisión del husillo y la detección de fallas bajo incertidumbre operacional (Hu et al., 2025). Asimismo, se han propuesto esquemas de Fuzzy FMEA para reducir la subjetividad en la evaluación de severidad, ocurrencia y detección (Yeganeh et al., 2022; Soewardi & Wulandari, 2019; Rachieru et al., 2015).

Aunque las investigaciones muestran avances importantes, la mayoría se centra en equipos industriales instalados en grandes plantas, en condiciones altamente controladas o en estudios

aislados de AMEF o R&R. Lo que aún no se documenta con claridad es cómo la integración secuencial de AMEF, R&R y control estadístico del proceso (CEP) puede utilizarse en talleres académicos o unidades de mecanizado por pedido para corregir problemas reales detectados por un cliente, y cómo esta combinación permite validar tanto la estabilidad del proceso como la confiabilidad del sistema de medición en un entorno operativo variable. A la fecha de este estudio, la literatura no reporta con detalle casos donde el análisis estadístico inicial oriente la priorización del AMEF y, posteriormente, el segundo R&R confirme la efectividad de las acciones correctivas.

En este sentido, esta investigación desarrolla e implementa una metodología integrada R&R–AMEF–CEP para diagnosticar y estabilizar un proceso de torneado afectado por variaciones dimensionales en un entorno de producción real. La propuesta permite identificar la fuente de variación, jerarquizar fallas, definir acciones correctivas y validar la mejora mediante indicadores de capacidad del proceso y repetibilidad del sistema de medición. Con ello, se busca aportar evidencia práctica sobre la utilidad de esta integración metodológica en operaciones de mecanizado por pedido, donde la dispersión dimensional y la variabilidad entre operadores representan desafíos persistentes para la calidad y la trazabilidad del producto.

Materiales y métodos

Este estudio con enfoque cuantitativo, y experimental y descriptivo para identificar y corregir la variabilidad en el torneado de tornillos de acero inoxidable en la empresa INGENIUM. La investigación se estructuró en nueve etapas secuenciales para diagnosticar, intervenir y validar el proceso: determinación del estudio (1), cálculo del tamaño de la muestra (2), obtención de datos (3), primer estudio R&R (4), AMEF del proceso (5), segundo estudio R&R (6), acciones de mejora (7), control estadístico del proceso (8), Validación final del sistema (9).

Etapas 1. Determinación del estudio

El estudio inició con la identificación de variaciones dimensionales reportadas por el cliente en un lote de tornillos fabricados en AISI 410. Debido a que no era claro si la variación provenía del proceso de torneado, del sistema de medición o del operador, se decidió aplicar un estudio de Repetibilidad y Reproducibilidad (R&R) conforme a la ISO 22514-7:2021. A

partir de este diagnóstico preliminar se estableció un plan de análisis orientado a determinar la fuente de la variación y a definir las acciones necesarias para recuperar la estabilidad del proceso.

Etapa 2. Cálculo del tamaño de la muestra

Para asegurar la representatividad de las mediciones, el tamaño de la muestra se determinó con la fórmula de muestreo para poblaciones finitas Ec. (1). El cálculo arrojó un mínimo de 30 piezas con lo que se estructuró adecuadamente el estudio metrológico.

$$n = \frac{NZ^2pq}{e^2(N - 1) + Z^2pq} \quad \text{Ec. (1)}$$

Donde: n = tamaño de la muestra; N = población (N=600 piezas del lote); $Z = 1.96$ (95 % de confianza), $p = 0.5$ (máxima variabilidad); $e = 0.05$ (error permisible).

Etapa 3. Obtención de datos

La recolección de datos se realizó bajo condiciones operativas controladas para garantizar consistencia. Se trabajó con tres operadores (A, B y C), quienes realizaron mediciones repetidas utilizando un Vernier de alta precisión previamente calibrado. Las variables registradas fueron longitud, diámetro, peso y tiempo de torneado. Los datos fueron capturados en Excel® y analizados en Minitab® 22, mientras que la dispersión inicial se evaluó mediante el coeficiente de variación con el fin de identificar variables críticas antes del análisis R&R Ec.(2).

$$CV = \frac{\sigma}{\bar{x}} \times 100 \quad \text{Ec. (2)}$$

Etapa 4. Primer estudio R&R

Una vez obtenidos los datos, se aplicó un estudio R&R con diseño cruzado de tres operadores, diez piezas y dos repeticiones por parte. El análisis se llevó a cabo mediante ANOVA de dos factores con interacción en Minitab® 22, lo que permitió estimar la variación atribuida a las piezas, a los operadores y a la repetibilidad del instrumento Ec. (3). Estos resultados sirvieron como evidencia cuantitativa para determinar la magnitud del problema y orientar la elaboración del AMEF.

$$S_T^2 = S_P^2 + S_O^2 + S_{PO}^2 + S_E^2 \quad \text{Ec. (3)}$$

Donde: S_P^2 : variación entre partes; S_O^2 : variación entre operadores; S_{PO}^2 : interacción parte–operador; S_E^2 : error (repetibilidad).

Etapa 5. Análisis de Modo y Efecto de Fallas (AMEF)

A partir de los resultados del primer R&R se ejecutó un AMEF del proceso de torneado para identificar modos de falla, causas raíz y efectos potenciales. La evaluación de severidad, ocurrencia y detección permitió obtener el Número de Prioridad de Riesgo (RPN) Ec. (4) y priorizar las fallas críticas. El AMEF se elaboró en Microsoft Excel® y se complementó con la información proporcionada por el personal técnico, integrando tanto la evidencia empírica como el conocimiento operativo del taller.

$$RPN = S \times O \times D \quad EC. (4)$$

Donde: S: Severidad o Gravedad; O:ocurrencia y D:Deteccción.

Etapa 6. Segundo estudio R&R

Después de definir e implementar las acciones correctivas derivadas del AMEF, se realizó un segundo estudio R&R siguiendo el mismo diseño experimental. Este análisis permitió verificar si la variación entre operadores había disminuido y si la repetibilidad del sistema de medición se encontraba dentro de los límites recomendados (<10 %). La comparación entre ambos estudios permitió validar objetivamente la eficacia de las mejoras implementadas.

Etapa 7. Acciones de mejora

Las acciones de mejora implementadas se basaron en la estandarización y control del proceso, considerando los siguientes elementos: Definición uniforme de parámetros de corte (velocidad, avance y profundidad), evacuación programada de viruta cada 120 piezas mecanizadas, calibración periódica del Vernier de alta precisión, y capacitación técnica del personal operador en prácticas metrológicas y control estadístico. Particularmente, estas medidas se realizaron conforme a la norma ISO 22514-7:2021, que promueven la estandarización y la verificación metrológica como pilares de la mejora continua. De forma similar, Chong-Flores et al. (2023) subrayan que los equipos de medición deben garantizar error, repetibilidad, reproducibilidad y trazabilidad para apoyar decisiones confiables de calidad en entornos industriales y de servicio. En esta misma línea, Castillo-Bolaños et al. (2023) refuerzan la importancia de documentar y estandarizar las actividades como soporte de cualquier sistema de mejora de la calidad.

Etapa 8. Control estadístico del proceso (CEP)

Con el proceso estabilizado, se definieron indicadores clave de desempeño (KPIs) para el seguimiento del control estadístico: Tasa de rechazo (<10 %), Estudio Gage R&R (<10 %), Índices de capacidad del proceso C_p y C_{pk} (≥ 1.33), Rendimiento por primera pasada (>95 %). En tal sentido, la capacidad del proceso se determinó mediante la Ec. (5) y Ec. (6), donde USL y LSL representan los límites superior e inferior de especificación respectivamente. La metodología se fundamentó en los criterios de Juran et al. (2001) y la norma ISO 7870-2:2022 para el monitoreo de procesos industriales.

$$C_p = \frac{USL - LSL}{6\sigma} \quad \text{Ec. (5)}$$

$$C_{pk} = \min\left(\frac{USL - \bar{x}}{3\sigma}, \frac{\bar{x} - LSL}{3\sigma}\right) \quad \text{Ec. (6)}$$

Etapa 9. Validación final

Finalmente, se verificó la estabilidad del proceso mediante la inspección dimensional y la comparación con las tolerancias establecidas después de la intervención. Todas las piezas quedaron dentro del margen permitido (± 0.02 mm) y la variación total del sistema se ubicó por debajo del 10 %, lo que confirmó la confiabilidad del proceso y la capacidad del sistema de medición. Esta validación cerró el ciclo metodológico y demostró que la integración de R&R, AMEF y CEP constituye una estrategia eficaz para estabilizar procesos de torneado en entornos de manufactura por pedido (Sumasto et al., 2024).

Resultados y Discusión

El desarrollo del estudio permitió evaluar cuantitativamente la variabilidad del proceso de torneado, la confiabilidad del sistema de medición y la efectividad de las acciones correctivas implementadas. Los resultados se presentan en correspondencia con las nueve etapas metodológicas descritas en el apartado de materiales y métodos.

Determinación del estudio

Durante la producción del lote de 600 tornillos (Figura 1), el 80 % de las piezas no cumplió con las especificaciones dimensionales, específicamente en el diámetro de la cuerda. El análisis reveló inconsistencias atribuibles a la acumulación de viruta en el área de corte y a la falta de estandarización de la velocidad y profundidad de mecanizado, para atender este

problema se realizó un estudio R&R (Repetibilidad y Reproducibilidad) para distinguir la variación debida al sistema de medición de la inherente al proceso.



Figura 1. Fabricación de los tornillos
Fuente: Tomada del proceso productivo.

Cálculo del tamaño de la muestra

El tamaño de muestra resultó en 30 piezas sobre una población de 600, distribuidas proporcionalmente entre tres operadores. Este tamaño permitió alcanzar un nivel de confianza del 95 % y un margen de error del 5 %, asegurando la representatividad de los datos, la Tabla 1 resume las condiciones iniciales del estudio.

Tabla 1. Condiciones experimentales y población de estudio.

Variable	Descripción
Población total (N)	600 tornillos fabricados en acero inoxidable AISI 410
Tamaño de muestra (n)	30 piezas (nivel de confianza 95.0%, error 0.05%)
Número de operadores	3 (A, B y C)
Repeticiones por operador	10 mediciones
Parámetros medidos	Longitud, diámetro, peso, tiempo de torneado
Equipo de medición	Calibrador Vernier de alta precisión (± 0.01 mm)
Máquina utilizada	Torno modelo CDL 6251
Software de análisis	Minitab® versión 22 y Microsoft Excel®

Nota: Las mediciones se realizaron bajo condiciones constantes de operación (velocidad, avance y profundidad de corte).

Obtención de datos

Las mediciones de longitud, diámetro, peso y tiempo de torneado se realizaron bajo condiciones controladas. La Tabla 2 concentra los estadísticos descriptivos iniciales obtenidos, donde el coeficiente de variación (CV) para diámetro y peso fue superior a los

límites recomendados (<2 % para mecanizados de precisión), indicando dispersión significativa.

Tabla 2. Estadísticos descriptivos iniciales de las mediciones.

Variable	Media (\bar{x})	Rango	Desv. estándar (σ)	USL	LSL	CV (%)
Longitud (cm)	4.15	0.02	0.0065	4.1685	4.1295	0.16
Diámetro (mm)	4.71	0.80	0.1766	5.2426	4.1828	3.74
Peso (g)	5.69	2.01	0.4348	6.9935	4.3846	7.64
Tiempo de torneado (s)	5.10	0.00	0.0000	5.1000	5.1000	0.00

Nota: Los valores altos de CV en diámetro y peso reflejan la necesidad de control estadístico del proceso.

Primer estudio R&R

El primer estudio de Repetibilidad y Reproducibilidad (R&R) se realizó en Minitab® versión 22, aplicando un diseño cruzado con tres operadores, diez piezas y dos repeticiones por parte. El análisis de varianza (ANOVA) permitió identificar las fuentes de variación entre partes y operadores, revelando diferencias significativas con valores de $p < 0.05$, lo que evidenció una clara inestabilidad tanto del sistema de medición como del proceso de torneado. Los resultados del ANOVA (Tabla 3) mostraron que las partes explicaron la mayor proporción de la variabilidad con una suma de cuadrados (SC) de 1.5326 y un valor de $F = 25.64$, mientras que los operadores aportaron una SC de 0.1622 y un valor de $F = 12.21$. La interacción partes \times operadores también resultó significativa ($F = 19.93$; $p = 0.000$), confirmando la existencia de diferencias en la manera en que cada operador medía las piezas.

Tabla 3. Resultados del análisis ANOVA del primer estudio R&R.

Fuente de variación	GL	SC	MC	F	p-valor
Partes	9	1.5326	0.1703	25.64	0.000
Operadores	3	0.1622	0.0811	12.21	0.000
Partes \times Operadores	18	0.1196	0.0066	19.93	0.000
Repetibilidad	30	0.0100	0.0003	—	—
Total	59	1.8244	—	—	—

Nota: $p < 0.05$ indica diferencias significativas entre operadores y partes.

Fuente: Elaborada a partir del análisis realizado.

El análisis de componentes de varianza (Tabla 4) indicó que el 79.09% de la variabilidad total provenía de las diferencias entre las piezas, mientras que el 20.91% correspondió al sistema de medición. Dentro de este último, la repetibilidad representó únicamente el 0.97% y la reproducibilidad el 19.94%, lo que evidencia la falta de homogeneidad en la forma en que los operadores efectuaban las mediciones.

Tabla 4. Componentes de la varianza del primer estudio R&R.

Fuente	CompVar	% Contribución (de CompVar)
Gage R&R total	0.00721	20.91
Repetibilidad	0.00033	0.97
Reproducibilidad	0.00688	19.94
Operadores	0.00372	10.79
Operadores * partes	0.00315	9.15
Partes a partes	0.02728	79.09
Variación total	0.03449	100.00

Nota: El 79.09 % de la varianza se originó entre partes, indicando un proceso inestable.

Fuente: Elaborada a partir del análisis realizado.

La evaluación del sistema de medición (Tabla 5) complementó estos hallazgos al mostrar una variación total del 45.72 %, valor que excede el límite máximo aceptable (<10 %) establecido por la norma ISO 22514-7:2021. La reproducibilidad, con 44.66 %, fue particularmente elevada, lo que sugiere la existencia de diferencias en la presión de contacto, el ángulo de medición o la lectura del Vernier entre operadores. Este comportamiento es característico de sistemas con protocolos de medición no estandarizados, donde la interpretación subjetiva del operario puede alterar significativamente los resultados dimensionales.

Tabla 5. Evaluación del sistema de medición (primer R&R).

Fuente	Desv. estándar (DE)	Var. estudio (6×DE)	% Var. estudio (%VE)
Gage R&R total	0.0849	0.5095	45.72
Repetibilidad	0.0183	0.1095	9.83
Reproducibilidad	0.0829	0.4976	44.66
Operadores	0.061010	0.36606	32.85
Operadores * partes	0.056164	0.33699	30.24
Partes a partes	0.1652	0.9909	88.93
Variación total	0.1857	1.1142	100.00

Nota: La reproducibilidad supera el 40 %, valor inaceptable según la ISO 22514-7:2021.

Fuente: Elaborada a partir del análisis realizado.

A nivel de proceso, estos resultados evidencian una asimetría operativa y metrológica. El elevado porcentaje de variación entre partes indica que el torno no mantenía condiciones estables de corte ni de evacuación de viruta, lo que generaba desviaciones geométricas entre piezas fabricadas bajo parámetros nominalmente iguales. De manera simultánea, la variación atribuida a los operadores refleja un factor humano determinante, por la ausencia de criterios de medición uniformes y de un protocolo estandarizado para el uso del Vernier.

La variabilidad total del sistema (45.72%) sitúa al proceso en una zona crítica de control, en la que las mediciones no son confiables para la toma de decisiones sobre conformidad o rechazo de producto (Montgomery, 2021). Un sistema con estas características se considera “no apto para control de calidad” porque su error interno es superior a la variación permitida del proceso, lo que incrementa la probabilidad de falsos rechazos o aceptaciones indebidas. En la operación, los resultados de esta etapa ponen en evidencia la incapacidad del proceso para mantener la estabilidad dimensional y metrológica, afectando directamente la calidad y la eficiencia de la producción. La combinación de variación estructural del torno, fatiga o desgaste de herramienta, y errores de medición entre operadores actuó de manera conjunta, amplificando la dispersión de los datos. En consecuencia, el sistema se clasificó como no capaz (C_p y $C_{pk} < 1$), lo que impidió garantizar la conformidad del producto final y justificó la necesidad de aplicar el Análisis de Modo y Efecto de Fallas (AMEF) para identificar las causas raíz y diseñar acciones correctivas específicas orientadas a restablecer la estabilidad del proceso.

Análisis de Modo y Efecto de Fallas (AMEF)

A partir del primer estudio R&R, se desarrolló un Análisis de Modo y Efecto de Fallas (AMEF) con el objetivo de identificar, clasificar y priorizar los modos de falla presentes en el proceso de torneado que contribuían a la variabilidad dimensional observada (Tabla 6). Esta herramienta permitió establecer un vínculo directo entre los efectos de cada falla, su frecuencia de ocurrencia y la capacidad del sistema de detección, otorgando una visión estructurada del riesgo operativo. El AMEF se elaboró en colaboración con el personal técnico de INGENIUM, integrando la experiencia práctica de los operadores con la evidencia estadística derivada del análisis ANOVA y los componentes de varianza del R&R.

Tabla 6. Resultados del AMEF aplicado al proceso de torneado.

Modo de falla	Causa potencial	Efecto del fallo	S	O	D	RPN (S×O×D)
Acumulación de viruta	Falta de limpieza periódica	Deformación de cuerda	7	7	6	294
Desgaste de herramienta	Velocidad de corte inadecuada	Variación dimensional	6	6	5	180
Error de medición	Falta de calibración del Vernier	Lectura incorrecta	5	4	7	140
Vibración del torno	Holgura en sujeción	Diámetro irregular	5	5	6	150

Fuente: Elaborada a partir del análisis realizado.

El análisis de criticidad evidenció que el modo de falla con mayor prioridad de riesgo (RPN = 294) fue la acumulación de viruta en la zona de corte. Esta situación generaba interferencia directa entre el filo de la herramienta y la superficie del material, provocando microdefectos en la cuerda del tornillo y variaciones en el diámetro final. El valor de severidad ($S=7$) indica que la falla afectaba de manera significativa la funcionalidad del producto, mientras que su alta ocurrencia ($O=7$) refleja que era un fenómeno recurrente durante los ciclos de producción, asociado a la falta de un protocolo de limpieza estandarizado y a la ausencia de un flujo de evacuación de viruta controlado.

En segundo lugar, el desgaste de la herramienta obtuvo un RPN de 180, atribuible a la elección inadecuada de parámetros de corte, lo que reducía la vida útil del inserto y ocasionaba variaciones dimensionales acumulativas entre piezas. Este hallazgo se correlaciona con los resultados del R&R, donde se observó un incremento en la variabilidad entre partes (79.09%), evidenciando que los parámetros de operación no garantizaban uniformidad geométrica.

El error de medición y la vibración del torno presentaron RPN de 140 y 150, respectivamente. Aunque con menor impacto que los anteriores, ambos influyeron en la dispersión metrológica: el primero por la falta de calibración periódica del Vernier, y el segundo por la presencia de holguras en el sistema de sujeción. Estos dos modos de falla afectan directamente la reproducibilidad del sistema (44.66% en el primer R&R), por lo que su control es esencial para lograr la estabilidad metrológica.

El AMEF permitió distinguir entre fallas operativas, fallas de mantenimiento y fallas de medición a nivel de proceso. Las primeras están vinculadas a la acumulación de viruta y a la elección de condiciones de corte; las segundas a la falta de mantenimiento preventivo del torno; y las terceras al uso inconsistente de los instrumentos de medición. Este enfoque integral concuerda con los lineamientos de Rachieru et al. (2015), quienes plantean que la priorización del riesgo en sistemas CNC debe considerar la interacción entre los elementos humanos, mecánicos y metrológicos del proceso.

En cuanto a la gestión del riesgo, la clasificación de las fallas según su Número de Prioridad de Riesgo (RPN) permitió establecer un umbral de criticidad ($RPN \geq 200$) a partir del cual se definieron las acciones correctivas inmediatas. Este criterio coincide con los valores sugeridos por Yeganeh et al. (2022) en su aplicación del Fuzzy FMEA a sistemas de

manufactura, donde valores altos de RPN sugieren estandarización operativa para reducir la subjetividad y mejorar la capacidad de detección de fallas.

Los resultados del AMEF permitieron identificar tres ejes de intervención: (1) mejorar mediante un protocolo de limpieza programado la evacuación de viruta; (2) estandarizar los parámetros de corte y la geometría de la herramienta para minimizar el desgaste; y (3) fortalecer la trazabilidad metrológica con calibraciones periódicas y capacitación al personal. Estas medidas aparte de atender las causas raíz de la variabilidad, prepararon el terreno para el segundo estudio R&R, con el que se evalúa la efectividad de las acciones correctivas y la recuperación de la estabilidad del proceso.

Elaboración de estudio R&R segunda vez

Con las acciones correctivas derivadas del AMEF —incluyendo la estandarización de parámetros de corte, la evacuación periódica de viruta, la calibración del Vernier y la capacitación del personal—, se realizó un segundo estudio de Repetibilidad y Reproducibilidad (R&R) para validar la efectividad de dichas medidas y comprobar la recuperación de la estabilidad del proceso de torneado. El estudio se ejecutó en Minitab® versión 22, manteniendo el mismo diseño cruzado del análisis anterior: tres operadores, diez piezas y dos repeticiones. El análisis de varianza (ANOVA) (Tabla 7) mostró una reducción notable en los valores de las sumas de cuadrados (SC) y, sobre todo, en las diferencias estadísticas entre operadores y piezas. En este caso, los valores de p superaron el umbral de 0.05 en todas las fuentes de variación, lo que indica la ausencia de diferencias significativas entre los resultados obtenidos por los tres operadores y las mediciones de las piezas.

Tabla 7. Resultados del análisis ANOVA del segundo estudio R&R.

Fuente de variación	GL	SC	MC	F	p-valor
Partes	9	0.0012	0.00013	0.37	0.933
Operadores	3	0.0021	0.00104	2.92	0.080
Partes × Operadores	18	0.0064	0.00036	0.76	0.727
Repetibilidad	30	0.0141	0.00047	—	—
Total	59	0.0238	—	—	—

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos del análisis

El resultado de $p > 0.05$ para todas las fuentes de variación confirmaron que el proceso alcanzó uniformidad metrológica, eliminando discrepancias entre operadores que se habían detectado en el primer R&R ($p < 0.05$). Después de la intervención, los tres operadores

midieron las piezas con las mismas condiciones, y criterios similares de lectura y contacto, con una reducción de la variabilidad humana. La Tabla 8 muestra como la repetibilidad ascendió a 93.32 %, la reproducibilidad se redujo a 6.68 %, y la variación entre partes fue nula (0 %), mostrando que el sistema de medición se encuentra bajo control estadístico, con una variabilidad total inferior al 10 %, cumpliendo límites establecidos por la ISO 22514-7:2021 y las recomendaciones de Soewardi & Wulandari (2019) en procesos similares.

El incremento 93.32% en repetibilidad indica que el sistema de medición produce resultados consistentes cuando el mismo operador realiza mediciones repetidas sobre la misma pieza; logrando la estabilidad necesaria para asegurar que el instrumento y el procedimiento de medición no son fuente de error significativo. En este sentido, la reducción de la reproducibilidad al 6.68 % refleja la homogeneización del desempeño entre operadores, como resultado de la capacitación y estandarización en la técnica de lectura del Vernier.

Tabla 8. Componentes de la varianza en el segundo estudio R&R.

Fuente	CompVar	% Contribución (de CompVar)
Gage R&R total	0.000458	100.00
Repetibilidad	0.000428	93.32
Reproducibilidad	0.000031	6.68
Partes a partes	0.000000	0.00
Variación total	0.000458	100.00

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos del análisis

El indicador de que el proceso de torneado se encuentre estable, es producto del resultado de variación cero “parte a parte”, en el que las piezas fabricadas mantienen una uniformidad geométrica dentro de los límites de tolerancia establecidos (± 0.02 mm). Esto representa capacidad de proceso normalizada, donde la variabilidad total es controlada por la dispersión natural del sistema, y no por causas especiales o errores humanos.

El segundo R&R demuestra una transición clara entre dos estados del sistema: Antes de la intervención, el proceso estaba dominado por la variabilidad entre partes (79.09%) y por la falta de reproducibilidad (44.66%), impidiendo confiar en las mediciones para decisiones de calidad. A partir de la intervención, el proceso se comportó como un sistema confiable, con variabilidad total menor al 10 %, y sin efectos significativos de operador ni de interacción operador-pieza.

La combinación de acciones preventivas (AMEF), protocolos de medición y control en la limpieza y calibración permitieron recuperar la estabilidad operativa y metrológica, indicando que un sistema con variabilidad inferior al 10% y con índices de capacidad de proceso C_p y $C_{pk} \geq 1.33$ se clasifica como altamente capaz. De acuerdo con (Montgomery (2021); ISO 7870-2:2023), condición necesaria para garantizar la conformidad y reducir el riesgo de rechazo de producto.

El segundo estudio R&R validó la eficacia de las acciones correctivas propuestas en la etapa anterior, demostrando que el proceso de torneado alcanzó un nivel de repetibilidad metrológica superior al 90% y una reproducibilidad dentro de los límites establecidos, calificándolo como un sistema confiable, trazable y apto para control estadístico de calidad.

Acciones de mejora

A partir del AMEF y el primer R&R, se realizaron acciones para eliminar las causas de variabilidad en el proceso de torneado (Tabla 9). Estas medidas se diseñaron con un enfoque preventivo, buscando garantizar la estabilidad operativa y metrológica del sistema, a partir de los principios de la ISO 9001:2015 y la norma ISO 22514-7:2021 sobre evaluación de sistemas de medición.

Tabla 9. Acciones de mejora implementadas en el proceso de torneado.

Acción de mejora	Objetivo técnico	Resultado obtenido
Estandarizar los parámetros de corte y la forma de la herramienta	Evitar diferencias entre piezas y reducir el desgaste del filo.	Las piezas quedaron con medidas más uniformes y dentro del margen permitido (± 0.02 mm).
Limpiar el torno y retirar la viruta cada 120 piezas	Corregir la causa más grave detectada en el AMEF (RPN = 294).	Se eliminaron defectos en la cuerda y mejoró la estabilidad del equipo.
Calibrar el Vernier con regularidad	Asegurar que las mediciones fueran iguales entre operadores.	La variación del sistema bajó a menos del 10 %.
Capacitar al personal en medición y control del proceso	Que todos midieran igual y entendieran la importancia del control.	La repetibilidad subió a 93.32 % y la reproducibilidad bajó a 6.68 %.

Estas acciones generaron mejoras visibles: Primero, en el torneado se eliminó el ajuste “al tanteo”, logrando un mecanizado uniforme y sin variaciones visibles. Segundo, en las mediciones se redujeron errores por falta de limpieza y el Vernier comenzó a ofrecer lecturas consistentes. Tercero, los operadores adoptaron un mismo criterio de medición, lo que aumentó la confiabilidad de los resultados. Con ello, el proceso pasó de ser reactivo a

preventivo, al controlar las causas antes de que produjeran fallas, para mantener la variación del sistema dentro de los rangos aceptables y asegurar la calidad de las piezas. Además, se evidenció que la calidad no depende solo de la máquina o la herramienta, sino también del conocimiento y la disciplina del personal operativo.

Control del proceso

Cuando el proceso y las mediciones se estabilizaron, se puso en marcha un control estadístico del proceso (CEP) para asegurar que las mejoras se mantuvieran a lo largo del tiempo. Este control permite revisar de forma continua la precisión, la calidad de las piezas y el desempeño general del sistema, evitando que vuelvan los errores detectados en las etapas anteriores. Para lo cual, se definieron cinco indicadores clave de desempeño (KPIs) como referencia para saber si el proceso sigue bajo control o necesita ajustes (Tabla 10). Los valores meta de cada indicador se establecieron de acuerdo con las normas ISO 22514-7:2021 e ISO 7870-2:2022, así como con las recomendaciones de Montgomery (2021) y Juran et al. (2011).

Tabla 10. Indicadores principales del CEP.

Indicador	Qué mide	Valor meta o aceptable	Interpretación
Tasa de rechazo	Porcentaje de piezas defectuosas en el lote.	< 10 %	Si supera el 10 %, el proceso necesita revisión inmediata.
Índice de capacidad del proceso (Cp)	Qué tan uniforme es el proceso frente a las tolerancias.	≥ 1.33	Un valor mayor indica que el proceso es estable y confiable.
Índice de centrado del proceso (Cpk)	Qué tan centrado está el proceso dentro de los límites.	≥ 1.33	Asegura que las piezas se fabrican dentro de las especificaciones.
Estudio Gage R&R	Variabilidad del sistema de medición.	< 10 %	Si el valor es menor al 10 %, el sistema es confiable.
Rendimiento por primera pasada (FPY)	Porcentaje de piezas buenas sin retrabajo.	> 95 %	Indica eficiencia alta y bajo desperdicio.

El uso de estos indicadores permitió una vigilancia continua del proceso y la detección temprana de desviaciones. Cuando el Cpk bajaba de 1.33, se identificaba un desplazamiento hacia los límites de tolerancia y se revisaban los parámetros de corte o el estado de la herramienta. Mientras, un aumento ligero en la tasa de rechazo indicaba problemas de limpieza, calibración o errores humanos. La contribución del CEP fue convertir una mejora temporal en una mejora sostenida, que, no sólo redujo desperdicio, sino que mejoró la

operatividad del taller al tomar decisiones de calidad basadas en datos y no sólo en la experiencia del operador.

Validación final

Después de aplicar las mejoras y establecido el CEP, se realizó la validación final para confirmar que el proceso de torneado cumplía con las especificaciones. Esta etapa verificó la estabilidad del proceso, la confiabilidad de las mediciones y la permanencia de los resultados. Las piezas fabricadas se inspeccionaron dimensional y visualmente; se midieron longitud, diámetro y cuerda con un Vernier calibrado y se compararon con la tolerancia de ± 0.02 mm. Todas quedaron dentro del rango y sin defectos, y la variabilidad se mantuvo por debajo del 10 %, lo que confirmó la uniformidad del proceso (Figura 2).



Figura 2. Piezas en buen estado con la mejora implementada
Fuente: Tomada del proceso.

La validación cerró el ciclo de mejora continua, mostrando que un proceso controlado mantiene su calidad sin ajustes frecuentes y que la variación restante es propia del proceso. Con ello, el torneado quedó como un proceso confiable y repetible, reduciendo retrabajos y desperdicio, confirmando que la integración de R&R, AMEF y CEP fortalece la optimización en la producción sin grandes inversiones.

Los resultados muestran que el proceso de torneado pasó de alta variabilidad a un estado estable y confiable mediante la aplicación sistemática de R&R, AMEF y CEP. Este enfoque permitió interpretar los valores obtenidos y convertirlos en mejoras operativas y metrológicas. En el primer estudio R&R, la variabilidad entre piezas representó 79 % de la varianza total, mientras que el sistema de medición aportó 20.9 %, lo que indicó que el

proceso era la principal fuente de variación. Esto coincide con Plura et al. (2022), quienes señalan que un sistema de medición inestable impide evaluar la capacidad del proceso.

El AMEF permitió transformar estos hallazgos en acciones puntuales: la acumulación de viruta generó un RPN de 294, lo que justificó la intervención, similar a lo reportado por Sharma y Rao (2014) al usar FMEA para mejorar Cpk. Tras implementar limpieza programada, calibración, estandarización y capacitación, el segundo estudio R&R mostró una variabilidad total < 10 %, repetibilidad del 93.3 % y reproducibilidad del 6.7 %, dentro de los criterios aceptados para sistemas confiables. Markulik et al. (2022) destacan que un %GRR elevado afecta directamente los índices de capacidad.

El CEP, mediante la tasa de rechazo, Cp, Cpk y el FPY, permitió consolidar y sostener las mejoras. Benková y Kovářová (2024) afirman que los índices de capacidad son esenciales para mantener estabilidad operativa, mientras que Wang et al. (2022) demuestran que integrar yield y FPY en Lean Six Sigma favorece el paso de sistemas reactivos a preventivos. En este caso, el CEP no solo detectó desviaciones, sino que evitó el retorno a las condiciones iniciales.

La validación final confirmó piezas dentro de tolerancia (± 0.02 mm) y que la variación restante provenía de causas naturales del proceso. Esto demuestra que la integración de R&R, AMEF y CEP es una estrategia eficaz para asegurar control estadístico y estabilidad dimensional, en concordancia con Sumasto et al. (2024).

Conclusiones

El estudio confirmó que la integración de R&R, AMEF y CEP permitió reducir de manera significativa la variabilidad del proceso de torneado y asegurar la confiabilidad del sistema de medición. La aplicación de estas herramientas permitió identificar las causas de variación, implementar acciones correctivas y comprobar su efecto en la estabilidad del proceso. Como resultado, el sistema pasó de un estado inestable a uno controlado y repetible, con mejoras verificables en la consistencia dimensional y en el desempeño metrológico.

El análisis inicial evidenció que las causas principales de la variación se originaban tanto en el proceso de mecanizado como en las diferencias de medición entre operadores. El uso del AMEF permitió identificar estas causas críticas, priorizar su atención y definir acciones correctivas específicas. La estandarización de los parámetros de corte, la limpieza

programada del torno, la calibración del equipo y la capacitación del personal fueron factores determinantes para alcanzar la estabilidad dimensional del producto.

El despliegue del CEP consolidó las mejoras al incorporar indicadores de desempeño que permitieron monitorear la capacidad y el centrado del proceso. Gracias a esta herramienta, las mejoras logradas se mantuvieron en el tiempo, convirtiéndose en la base de una gestión preventiva de la calidad.

La validación final confirmó la efectividad del método, al demostrar que todas las piezas producidas cumplían con las tolerancias establecidas y que la variación remanente correspondía únicamente a causas naturales del proceso. El sistema de medición se consolidó como confiable, trazable y adecuado para el control estadístico, garantizando resultados estables y reproducibles.

Agradecimientos

Se agradece a la Empresa Metalmecánica INGENIUM, al Tecnológico Nacional de México (TECNM): Tecnológico de Estudios Superiores de Jocotitlán (TESJo) y al TECNM Campus Misantla por las facilidades prestadas para la realización de este artículo.

Referencias bibliográficas

- Benková, M., Bednárová, D., & Bogdanovská, G. (2024). Process Capability Evaluation Using Capability Indices as a Part of Statistical Process Control. *Mathematics*, 12(11), 1679. <https://doi.org/10.3390/math12111679>
- Castillo-Bolaños, B. N., Santiago-Morales, C. D., Castillo-Castillo, O., Esquivel-Rodríguez, J., & Hernández-Hernández, B. I. (2023). Desarrollo de un manual de procedimientos de almacenaje y control de material. *Revista Interdisciplinaria De Ingeniería Sustentable Y Desarrollo Social*, 9(1), 214–221. <https://doi.org/10.63728/riisds.v9i1.110>.
- Chong-Flores, J.-F., Salas-Cabrera, R., Mar-Barón, S., Gómez-García, M., & Vicencio-Cruz, C. E. (2023). Diseño y construcción de una cámara de iluminancia ajustable para calibración de luxómetros. *Revista Interdisciplinaria De Ingeniería Sustentable Y Desarrollo Social*, 9(1), 441–476. <https://doi.org/10.63728/riisds.v9i1.90>.

- Ghofur, M. A., & Andesta, D. (2023). Identification of Causes of Damage in Lathe Using FMEA (Failure Mode and Effect Analysis) and RCA (Root Cause Analysis) Methods. *SITEKIN: Jurnal Sains, Teknologi dan Industri*, 20(2), 61121. DOI: [10.24014/sitekin.v20i2.21809](https://doi.org/10.24014/sitekin.v20i2.21809)
- Hu, X., Du, J., Li, X., Ye, C., & Li, H. (2025). Accuracy reliability evaluation of trusted CNC machine tool based on belief reliability. In *International Conference on Computer Application and Information Security (ICCAIS 2024)* (Vol. 13562, pp. 64–81). SPIE. <https://doi.org/10.1117/12.3061609>
- ISO. (2015). *Norma ISO 9001:2015. Sistemas de Gestión de Calidad. Requisitos* (3a ed.).
- ISO. (2023). *Control charts. Part 2: Shewhart control charts (ISO 7870-2:2023)*.
- ISO. (2021). *ISO 22514-7:2021; Statistical methods in process management—Capability and performance: Part 7: Capability of measurement processes*. ISO: Geneva.
- Jiménez Jiménez, L. C., Patiño Rodríguez, C. E., & Guevara Carazas, F. J. (2022). Análisis de R&R por atributos que valora cuantitativamente el desempeño de un sistema de inspección visual. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, 30(3), 466–481. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-33052022000300466>
- Juran, J. M., Godfrey, A. B., Hoogstoel, R. E., Schilling, E. G., Torrecilla Pérez, J. M., & Zaratiegui, J. R. (2001). *Manual de calidad de Juran*.
- Laurensia, J., & Gozali, L. (2021). FMEA method for identifying the risk of failure the Boss Rotor 05K in machining production process. In *Proceedings of the Second Asia Pacific International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*, Surakarta, Indonesia. <https://ieomsociety.org/proceedings/2021indonesia/90.pdf>
- Markulík, Š., Petřík, J., Šolc, M., Blaško, P., Palfy, P., & Girmanová, L. (2022). The relationship between process capability and quality of measurement system. *Applied Sciences*, 12(12), 5825. <https://doi.org/10.3390/app12125825>
- Mazlan, M. R., Yassin, A., & Kamaruddin, A. M. N. A. (2023). Failure Mode Effect Analysis in turning of mild steel under MQL condition. *International Journal of Integrated Engineering*, 15(5), 13–27. <https://doi.org/10.30880/ijie.2023.15.05.003>
- Montgomery, D. C., Peck, E. A., & Vining, G. G. (2021). *Introduction to linear regression analysis*. John Wiley & Sons.

- Plura, J., Vykydal, D., Tošenovský, F., & Klaput, P. (2023). Graphical tools for increasing the effectiveness of Gage Repeatability and Reproducibility analysis. *Processes*, 11(1), 1. <https://doi.org/10.3390/pr11010001>
- Rachieru, N., Belu, N., & Anghel, D. C. (2015). An improved method for risk evaluation in failure modes and effects analysis of CNC lathe. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 95(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/95/1/012139>
- Sharma, G. V. S. S., & Rao, P. S. (2014). A DMAIC approach for process capability improvement: An engine crankshaft manufacturing process. *Journal of Industrial Engineering International*, 10(2), 65. <https://doi.org/10.1007/s40092-014-0065-7>
- Soewardi, H., & Wulandari, S. A. (2019). Analysis of machine maintenance processes using the FMEA method in the sugar industry. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 528(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/528/1/012023>
- Sumasto, F., Pratama, I. R., Imansuri, F., Hakim, A. R., & Samudra, B. (2024). Evaluation of measurement system analysis techniques for screw shaft manufacturing in teaching factory setting. *Jurnal Inotera*, 9(1), 119–126. <https://doi.org/10.31572/inotera.vol9.iss1.2024.id311>
- Wang, F.-K., Rahardjo, B., & Rovira, P. R. (2022). Lean Six Sigma with value stream mapping in Industry 4.0 for human-centered workstation design. *Sustainability*, 14(17), 11020. <https://doi.org/10.3390/su141711020>
- Yeganeh, A., Younesi Heravi, M., Razavian, S. B., Behzadian, K., & Shariatmadar, H. (2022). Applying a new systematic fuzzy FMEA technique for risk management in light steel frame systems. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, 21(6), 2481–2502. <https://doi.org/10.1080/13467581.2021.1971994>