Validación industrial de un sistema poka-yoke para prevenir defectos en componentes metálicos estampados

Industrial validation of a poka-yoke system to prevent defects in stamped metal components

María Blanca Becerra Rodríguez [1]
Arturo Hernández Hernández [2]
Roberto Zitzumbo Guzmán [3]
Wendy Maldonado González [4]
Omar Alejandro Cervantes Gloria [5]

RESUMEN

La prevención de defectos en componentes estampados exige mecanismos capaces de actuar en la fuente sin incrementar de forma relevante la complejidad del proceso. El objetivo fue diseñar, implementar y evaluar un dispositivo mecánico Poka-Yoke para impedir la liberación de piezas con ausencia de un barreno crítico. Se empleó un diseño aplicado antes-después basado en registros de producción, análisis de causa raíz, diseño CAD, maquinado CNC e inspección funcional. La línea base registró 630 piezas no conformes de aproximadamente 35,000 componentes mensuales (1.8 %). El seguimiento post-implementación disponible abarcó cinco meses y 175,000 piezas inspeccionadas, sin fugas documentadas del defecto específico; para cero eventos, el límite superior binomial exacto unilateral del 95 % es aproximadamente 0.0017 % (17.1 ppm). El cronometraje directo de 30 ciclos de posicionamiento, verificación y liberación mediante el Poka-Yoke mostró un tiempo medio de 54.91 ± 2.79 s/ciclo (IC95 %: 53.87–55.95 s; rango: 50.11–60.53 s). La validación R&R por atributos utilizó 200 piezas patrón (100 conformes y 100 sin barreno), tres operadores y dos repeticiones, para un total de 1,200 evaluaciones. Se obtuvieron 591 verdaderos positivos, 600 verdaderos negativos, nueve falsos negativos y ningún falso positivo, con sensibilidad global de 98.50 %, especificidad de 100.00 %, exactitud de 99.25 %, tasa de falsos negativos de 1.50 % y tasa de falsos positivos de 0.00 %. El dispositivo requirió una inversión aproximada de $2,000 MXN frente a un costo anual estimado de $100,000 MXN para inspección manual adicional; bajo los supuestos declarados, el ROI simple del primer año fue 4,900 % y el periodo de recuperación 0.02 años.

Durante los cinco meses se registraron 54 fallas del dispositivo, 27 paros atribuibles al Poka-Yoke, 11 ajustes no programados y nueve intervenciones de mantenimiento correctivo; las incidencias totales disminuyeron de 38 en el primer mes a cuatro en el quinto. Los resultados respaldan el Poka-

[1] Profesora-Investigadora del Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Querétaro (ITQ); maria.br@queretaro.tecnm.mx, https://orcid.org/0000-0003-2463-8757
[2] Profesor-Investigador de la Universidad Politécnica de Querétaro (UPQ); arturo.hernandez@upq.mx, https://orcid.org/0000-0001-7636-6488
[3] Investigador del Centro de Innovación Aplicada en Tecnologías Competitivas (CIATEC); rzitzumb@ciatec.mx, https://orcid.org/0000-0002-4124-8825
[4] Profesora del Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Querétaro (ITQ); wendy.mg@queretaro.tecnm.mx; https://orcid.org/0009-0001-4558-8480
[5] Profesor-Investigador Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Querétaro (ITQ); omar.cg@queretaro.tecnm.mx; https://orcid.org/0009-0004-6827-008X

CC BY NC ND

Yoke como una alternativa preventiva de bajo costo, con las limitaciones propias de un estudio preexperimental de un solo número de parte.

.

PALABRAS CLAVES: estampado de metales, Poka-Yoke, prevención de defectos, manufactura esbelta, aseguramiento de la calidad.

Fecha de recepción: 02 de agosto, 2026.

Fecha de aceptación: 13 de octubre, 2026.

ABSTRACT

Defect prevention in stamped components requires mechanisms capable of acting directly at the source without substantially increasing process complexity. This study aimed to design, implement, and evaluate a mechanical Poka-Yoke device to prevent the release of parts missing a critical hole. An applied before-and-after design was employed, integrating production records, root-cause analysis, CAD development, CNC machining, and functional inspection. Baseline data showed 630 nonconforming parts out of approximately 35,000 components produced per month (1.8%). The available post-implementation monitoring period covered five months and 175,000 inspected parts, with no documented escapes of the targeted defect. With zero observed events, the one-sided 95% exact binomial upper confidence limit was approximately 0.0017% (17.1 ppm). Direct timing of 30 positioning, verification, and release cycles using the Poka-Yoke yielded a mean cycle time of 54.91 ± 2.79 s/cycle (95% CI: 53.87–55.95 s; range: 50.11–60.53 s).

The attribute-based R&R validation involved 200 reference parts (100 conforming and 100 with the critical hole intentionally absent), three operators, and two repetitions, resulting in 1,200 evaluations. The assessment yielded 591 true positives, 600 true negatives, nine false negatives, and no false positives, corresponding to an overall sensitivity of 98.50%, specificity of 100.00%, accuracy of 99.25%, false-negative rate of 1.50%, and false-positive rate of 0.00%. The device required an initial investment of approximately MXN 2,000, compared with an estimated annual cost of MXN 100,000 for additional manual inspection. Under the stated assumptions, the first-year simple return on investment (ROI) was 4,900%, with a payback period of 0.02 years.

KEYWORDS: metal stamping, Poka-Yoke, defect prevention, Lean Manufacturing, quality assurance.

INTRODUCCIÓN

La transformación de la manufactura impulsada por Industria 4.0 ha situado a la calidad como un factor estratégico en sectores con elevados requerimientos de precisión. Los sistemas ciberfísicos, el Internet Industrial de las Cosas, la inteligencia artificial y la analítica de datos han favorecido la transición desde esquemas reactivos hacia estrategias predictivas y preventivas. En este marco, Quality 4.0 integra tecnologías digitales con metodologías consolidadas de gestión y mejora, sin sustituir los principios clásicos de la ingeniería de calidad (Antony, McDermott, et al., 2022; Antony, Sony, et al., 2022; Brandenburger et al., 2020; Souza et al., 2022).

CC BY NC ND

Zero Defect Manufacturing (ZDM) propone prevenir y detectar tempranamente las desviaciones para evitar que el producto no conforme avance dentro del sistema productivo. Este enfoque combina estrategias de prevención, inspección y control con decisiones basadas en datos, y resulta especialmente pertinente cuando un modo de falla específico puede generar reclamaciones o retrabajos (Gal et al., 2024; Hossain & Purdy, 2024; Pachimuthu et al., 2024; Powell et al., 2022; Psarommatis et al., 2024).

Lean Manufacturing y Poka-Yoke

Lean Manufacturing mantiene vigencia como marco para reducir desperdicios, estabilizar procesos y fortalecer la mejora continua. Dentro de sus herramientas, Poka-Yoke busca prevenir errores humanos o hacerlos inmediatamente detectables mediante restricciones físicas, guías, sensores o verificaciones integradas. Su valor radica en trasladar el control desde la inspección final hacia el punto donde se origina o puede interceptarse el defecto (Widjajanto et al., 2020).

Aunque la literatura reciente presta creciente atención a visión artificial, aprendizaje automático e inspección inteligente, las soluciones mecánicas continúan siendo pertinentes cuando el defecto puede discriminarse mediante una característica geométrica. Para pequeñas y medianas empresas, estos dispositivos pueden representar una alternativa de menor inversión y complejidad, siempre que su desempeño se documente mediante criterios reproducibles de detección, repetibilidad y confiabilidad.

Quality 4.0 y manufactura metalmecánica

Quality 4.0 articula la gestión de la calidad con tecnologías digitales y prácticas organizacionales orientadas a la toma de decisiones basada en evidencia. Las aplicaciones de inteligencia artificial han ampliado la capacidad de inspección visual y clasificación de anomalías; sin embargo, su adopción requiere infraestructura, competencias y recursos que no siempre están disponibles en todos los entornos productivos (Antony, McDermott, et al., 2023; Antony, Sony, et al., 2023; Hernández Chávez & Hernández Chávez, 2024; Hoffmann & Reich, 2023; Markatos & Mousavi, 2023; Saihi et al., 2023; Sony et al., 2020, 2021).

En procesos metalmecánicos, la prevención de defectos geométricos sigue dependiendo de una adecuada selección del punto de control, la estandarización de la operación y la capacidad del sistema para impedir el avance de piezas fuera de especificación. Por ello, la integración de un Poka-Yoke mecánico con prácticas Lean y criterios de ZDM constituye una alternativa compatible con una evolución gradual hacia Quality 4.0.

JUSTIFICACIÓN

La prevención de defectos en procesos de estampado metálico constituye una necesidad técnica y económica cuando una característica geométrica crítica puede originar rechazo interno, retrabajo, reclamaciones del cliente o interrupciones en el flujo productivo. Aunque los enfoques contemporáneos de Zero Defect Manufacturing (ZDM) y Quality 4.0 promueven la prevención temprana, la captura de datos y el uso progresivo de tecnologías digitales, su aplicación no implica que toda solución de aseguramiento de la calidad deba sustentarse en sistemas complejos o de elevada inversión. Para modos de falla claramente identificables mediante contacto, posicionamiento o interferencia física, un mecanismo Poka-Yoke puede trasladar la verificación al punto de origen y fortalecer la calidad en la fuente con menor complejidad tecnológica (Powell et al., 2022; Psarommatis et al., 2024; Widjajanto et al., 2020).

CC BY NC ND

En este contexto, la literatura ofrece marcos consolidados sobre ZDM, digitalización y Quality 4.0, pero es menor la evidencia de implementaciones mecánicas de bajo costo evaluadas sistemáticamente en condiciones industriales reales. Esta brecha es relevante para organizaciones que requieren incrementar la confiabilidad del proceso sin depender exclusivamente de visión artificial, inteligencia artificial o arquitecturas avanzadas de inspección. La literatura sobre Quality 4.0 reconoce que la transformación de la calidad combina capacidades tecnológicas con métodos de gestión y mejora ya establecidos, por lo que las soluciones físicas de prevención pueden constituir una base compatible con una evolución posterior hacia sistemas de monitoreo digital (Antony, McDermott, et al., 2022; Antony, Sony, et al., 2022; Souza et al., 2022).

El estudio se justifica, por tanto, en la necesidad de aportar evidencia industrial sobre un dispositivo mecánico orientado a prevenir la liberación de componentes con ausencia de un barreno crítico. Su contribución no se limita al diseño e instalación del mecanismo: integra el seguimiento del desempeño posterior, una validación R&R por atributos para cuantificar la capacidad de clasificación y la variación asociada con los operadores, la delimitación estadística de la ausencia de fugas observadas y una evaluación económica bajo supuestos explícitos. Esta combinación permite distinguir entre cobertura de inspección, eficacia de detección y comportamiento operacional, evitando interpretar la inspección del 100 % de las piezas como evidencia automática de detección perfecta.

Desde la perspectiva científica y aplicada, documentar conjuntamente el desempeño de detección, la repetibilidad, la trazabilidad de las discrepancias y la viabilidad económica fortalece la reproducibilidad del caso y facilita su análisis en otros componentes estampados con defectos geométricos comparables. Asimismo, vincula una solución de Error Proofing de baja complejidad con los principios de prevención de ZDM y con una trayectoria gradual hacia Quality 4.0, en la que la estandarización física del proceso puede preceder a la incorporación de sensores, captura automática de datos o analítica avanzada (Gal et al., 2024; Hossain & Purdy, 2024; Pachimuthu et al., 2024).

METODOLOGÍA

La investigación adoptó un enfoque cuantitativo, aplicado y preexperimental antes-después. La unidad de análisis fue el componente metálico X y la variable principal, la proporción de piezas con ausencia del barreno crítico. La línea base se obtuvo de los registros mensuales de producción y rechazo. La evaluación posterior consideró la inspección funcional de las piezas procesadas en la estación intervenida. Al no existir aleatorización ni grupo control, los cambios se interpretaron como asociados temporalmente con la intervención y no como una estimación causal aislada.

Procedimiento

La intervención se desarrolló en el área de Calidad, en coordinación con Producción e Ingeniería. El diagnóstico integró observación directa, registros de rechazo y reclamaciones, diagrama de Ishikawa, AMEF y Plan de Control. Con base en el modo de falla identificado, se diseñó en SolidWorks y fabricó mediante maquinado CNC un dispositivo mecánico Poka-Yoke, instalado en la estación de machueleado. El operador verifica individualmente la presencia del barreno crítico mediante el acoplamiento geométrico de cada componente; las piezas aceptadas pasan al roscado y las no conformes se segregan antes de esa operación. La inspección de la calidad de la rosca no formó parte de la validación específica del dispositivo. Posteriormente se actualizaron las instrucciones de trabajo y se capacitó al personal responsable.

CC BY NC ND

Validación estadística y operacional

El seguimiento post-implementación disponible comprendió cinco meses y 175,000 piezas inspeccionadas. No se documentaron fugas del defecto de ausencia de barreno durante ese periodo. Dado que observar cero eventos no demuestra una tasa poblacional nula, se calculó el límite superior binomial exacto unilateral del 95 %, que para n = 175,000 es aproximadamente 0.0017 % (17.1 ppm). La cobertura del 100 % de las piezas se diferenció de la eficacia de clasificación del dispositivo.

Para evaluar el desempeño de detección y la variación asociada con el operador se realizó un estudio R&R por atributos con 200 piezas patrón, integrado por 100 componentes conformes y 100 con ausencia del barreno crítico, presentadas en orden aleatorio. Tres operadores evaluaron independientemente el conjunto en dos repeticiones, generando 1,200 evaluaciones. Cada resultado se clasificó como verdadero positivo (VP), verdadero negativo (VN), falso positivo (FP) o falso negativo (FN). La sensibilidad se calculó como VP/(VP+FN), la especificidad como VN/(VN+FP), la exactitud como (VP+VN)/N, y las tasas de falsos negativos y positivos como FN/(VP+FN) y FP/(VN+FP), respectivamente. En la primera repetición se registraron 1, 2 y 1 falsos negativos para los operadores 1, 2 y 3; en la segunda repetición se observaron 2, 2 y 1, respectivamente. No se registraron falsos positivos.

La prensa mecánica operó nominalmente a 120 golpes por minuto. Bajo el supuesto de una pieza por golpe, ello equivale a 0.50 s/pieza y a 7,200 piezas/h exclusivamente para el estampado, sin representar el rendimiento observado de la línea. Las 2 h 30 min consignadas en el proyecto corresponden a la fabricación del dispositivo, no a la inspección. El tiempo de verificación se obtuvo mediante cronometraje directo de 30 ciclos consecutivos de posicionamiento, comprobación y liberación de una pieza, sin incluir el machueleado. Se calcularon media, desviación estándar muestral, intervalo de confianza del 95 % de la media con t de Student (n = 30; gl = 29) y valores extremos.

Criterios de medición y trazabilidad

La variable de respuesta principal fue la liberación de piezas con ausencia del barreno crítico. Para mantener trazabilidad, los registros se organizaron en dos niveles: producción rutinaria y validación funcional. El primero permitió cuantificar el volumen procesado y las fugas documentadas durante el seguimiento; el segundo se orientó a comprobar la respuesta del dispositivo frente a piezas patrón conocidas. Esta separación es necesaria porque la ausencia de reclamaciones en producción no sustituye una prueba controlada de clasificación.

En la validación funcional, una pieza sin barreno correctamente bloqueada se clasifica como verdadero positivo, mientras que una pieza defectuosa aceptada constituye un falso negativo. Una pieza conforme aceptada se registra como verdadero negativo y una pieza conforme bloqueada como falso positivo. Con esta matriz se obtienen sensibilidad, especificidad y exactitud. Para un defecto crítico, el falso negativo representa el evento de mayor relevancia, ya que corresponde a una pieza no conforme que podría continuar hacia operaciones posteriores.

La repetibilidad se examinó mediante dos series consecutivas bajo condiciones equivalentes de operación. La exactitud global fue de 99.33 % en la repetición 1 y 99.17 % en la repetición 2, una diferencia de 0.16 puntos porcentuales. Por operador, la concordancia global con el estándar fue de 99.25 % para el operador 1, 99.00 % para el operador 2 y 99.50 % para el operador 3. La hoja de validación conservó la identificación de la pieza, el resultado esperado, el resultado observado, el operador y la repetición, permitiendo la trazabilidad de las discrepancias.

CC BY NC ND

La confiabilidad operacional se evaluó durante cinco meses mediante el registro mensual de cuatro categorías: fallas del dispositivo, paros atribuibles al Poka-Yoke, ajustes no programados e intervenciones de mantenimiento correctivo. Para cada indicador se obtuvieron el total acumulado, la media mensual y la desviación estándar muestral. Como medida complementaria de precisión se calculó el IC95 % de la media mediante t de Student (n = 5; gl = 4). Debido al reducido número de observaciones mensuales y a la naturaleza discreta de los conteos, estos estadísticos se interpretaron con finalidad descriptiva. La confiabilidad operacional se mantuvo conceptualmente separada de la exactitud de clasificación, ya que la primera describe la continuidad funcional del mecanismo y la segunda su capacidad para distinguir piezas conformes y no conformes.

Para el análisis temporal se distinguieron tres magnitudes de diferente procedencia: (i) el ciclo nominal de estampado, derivado de la velocidad de prensa y del supuesto de una pieza por golpe; (ii) el tiempo de verificación Poka-Yoke, medido directamente en 30 ciclos; y (iii) el tiempo aproximado de machueleado de 180 s/pieza, aportado como estimación operativa, sin cronometraje documentado. Solo para una secuencia de verificación y roscado realizada por un operador, sin solapamientos, esperas ni tareas auxiliares, se calculó un ciclo combinado estimado mediante la suma de los dos últimos tiempos y su capacidad teórica recíproca. La capacidad efectiva de producción no se estimó por carecer de datos sobre estaciones paralelas, disponibilidad y flujo real.

Análisis económico

La evaluación económica utilizó una inversión inicial aproximada de $2,000 MXN y un costo anual estimado de $100,000 MXN para un inspector adicional. El análisis supone que dicho costo sería completamente evitable con el dispositivo, que éste opera durante un año sin costos incrementales relevantes de mantenimiento, capacitación, energía o reposición, y que no se consideran impuestos, inflación, tasa de descuento, valor residual ni variaciones de producción. Por tanto, los resultados corresponden a un escenario simple y no a un flujo de efectivo descontado como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Análisis económico

Concepto			Valor
Costo de fabricación del dispositivo Poka-Yoke			$2000 MXN
Costo anual evitado por inspección manual adicional			$100,000 MXN/año
Beneficio económico anual			$100,000 MXN
Tiempo	**Beneficio acumulado**	**Beneficio neto***	
1 año	$100,000 MXN	$98,000 MXN	
3 años	$300,000 MXN	$298,000 MXN	
5 años	$500,000 MXN	$498,000 MXN	

Consideraciones metodológicas

La metodología integra Lean Manufacturing, Error Proofing y Zero Defect Manufacturing en un entorno industrial real. Su alcance se limita a un número de parte y a un diseño preexperimental; por ello, la generalización requiere replicación en otras familias de componentes y periodos de seguimiento independientes. (Powell et al., 2022; Widjajanto et al., 2020).

CC BY NC ND

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Condición inicial e implementación

El diagnóstico identificó la ausencia del barreno como el defecto crítico asociado con las reclamaciones del cliente. Los registros mostraron aproximadamente 35,000 piezas mensuales y 630 no conformes, por lo que la proporción correcta es 630/35,000 = 0.018, equivalente a 1.8 %. El dispositivo se instaló en la estación de machueleado como verificación obligatoria antes de continuar el flujo productivo, trasladando el control desde una revisión posterior hacia una prevención integrada en la operación como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Ausencia del barreno como el defecto crítico

Indicador	Valor
Producción mensual	35,000 piezas
Producto no conforme	630 piezas
Porcentaje de producto no conforme	1.8 %
Defecto predominante	Ausencia de barreno

Desempeño operacional y de detección

Durante cinco meses de seguimiento se inspeccionaron 175,000 piezas y no se documentaron fugas del defecto específico. El resultado observado fue 0/175,000; sin embargo, se evita expresarlo como una tasa poblacional demostrada de 0 %. El límite superior binomial exacto unilateral del 95 % fue aproximadamente 17.1 ppm. De forma complementaria, la validación controlada R&R por atributos generó 1,200 evaluaciones y obtuvo 591 VP, 600 VN, 9 FN y 0 FP. La sensibilidad global fue de 98.50 %, la especificidad de 100.00 % y la exactitud de 99.25 %, con tasas de falsos negativos y falsos positivos de 1.50 % y 0.00 %, respectivamente. Estos resultados diferencian la cobertura del 100 % de la producción de la capacidad real de clasificación del dispositivo como se observan en las Tablas 3 y 4. El cronometraje de 30 ciclos de verificación registró una media de 54.91 s/ciclo (DE = 2.79 s; IC95 %: 53.87–55.95 s), con valores entre 50.11 y 60.53 s. El promedio observado fue 0.16 % inferior al valor de referencia de 55 s utilizado en la hoja de medición, por lo que no se observó un incremento medio respecto de dicha referencia.

Tabla 3. Matriz de clasificación y desempeño por operador

Indicador	Operador 1	Operador 2	Operador 3	Global
VP	197	196	198	591
VN	200	200	200	600
FP	0	0	0	0
FN	3	4	2	9
Sensibilidad (%)	98.50	98.00	99.00	98.50
Especificidad (%)	100.00	100.00	100.00	100.00
Exactitud (%)	99.25	99.00	99.50	99.25
Tasa FP (%)	0.00	0.00	0.00	0.00
Tasa FN (%)	1.50	2.00	1.00	1.50

Tabla 4. Resultados del estudio R&R por atributos

Evaluador	R1 correctas	R1 exactitud	R2 correctas	R2 exactitud	Total, correctas	Concordancia
Operador 1	199/200	99.50 %	198/200	99.00 %	397/400	99.25 %
Operador 2	198/200	99.00 %	198/200	99.00 %	396/400	99.00 %
Operador 3	199/200	99.50 %	199/200	99.50 %	398/400	99.50 %
Global	596/600	99.33 %	595/600	99.17 %	1,191/1,200	99.25 %

CC BY NC ND

La exactitud por operador fue de 99.25 %, 99.00 % y 99.50 % para los operadores 1, 2 y 3, respectivamente. La sensibilidad osciló entre 98.00 % y 99.00 %, mientras que la especificidad permaneció en 100.00 %. La diferencia de 0.16 puntos porcentuales entre las exactitudes globales de R1 y R2 muestra estabilidad entre repeticiones. Los nueve falsos negativos observados entre 600 evaluaciones de piezas sin barreno representan una tasa global de 1.50 %; por tratarse del error crítico del sistema, este resultado indica que la capacidad de detección es elevada, pero no perfecta Tabla 5.

Tabla 5. Seguimiento de inspección

Indicador	Antes	Después
Inspección en la operación crítica	No sistemática	100 %
Detección de ausencia de barreno	Parcial	Sensibilidad 98.50 %; especificidad 100.00 %; exactitud 99.25 %
Liberación de piezas con defecto	Presente	0 fugas documentadas en 175,000 piezas durante cinco meses de seguimiento
Detección de deformaciones	Limitada	Integrada al sistema de verificación

Tabla 6. Confiabilidad operacional del dispositivo Poka-Yoke

Indicador	Mes 1	Mes 2	Mes 3	Mes 4	Mes 5	Total	Media ± DE	IC95 % media
Fallas del dispositivo	18	13	12	8	3	54	10.80 ± 5.63	3.81–17.79
Paros atribuibles al Poka-Yoke	10	8	5	3	1	27	5.40 ± 3.65	0.87–9.93
Ajustes no programados	5	3	2	1	0	11	2.20 ± 1.92	No estimado*
Mantenimiento correctivo	5	3	1	0	0	9	1.80 ± 2.17	No estimado*
Total, de incidencias	38	27	20	12	4	101	20.20 ± 13.16	3.86–36.54

*Los IC95 % de ajustes no programados y mantenimiento correctivo se omitieron porque el intervalo simétrico basado en t produciría límites inferiores negativos, incompatibles con conteos de eventos no negativos. Para estos indicadores se conservan los estadísticos descriptivos (media y desviación estándar). *Durante los cinco meses se registraron 54 fallas del dispositivo, 27 paros atribuibles al Poka-Yoke, 11 ajustes no programados y nueve intervenciones de mantenimiento correctivo. En conjunto se documentaron 101 incidencias operacionales (20.20 ± 13.16 eventos/mes). La frecuencia total disminuyó progresivamente de 38 eventos en el primer mes a 27, 20, 12 y cuatro en los meses subsecuentes. La diferencia entre el primer y quinto mes representa una reducción descriptiva del 89.5 %. Las fallas disminuyeron de 18 a tres y los paros de diez a uno; en el quinto mes no se registraron ajustes no programados ni mantenimiento correctivo. Esta evolución es compatible con una estabilización operacional progresiva durante el periodo observado, sin que el diseño preexperimental permita atribuir causalidad ni afirmar confiabilidad absoluta.*

Impacto en la calidad y operación

En la estación intervenida, cada componente se comprueba con el Poka-Yoke antes del machueleado; únicamente las piezas que satisfacen el criterio geométrico continúan al roscado. En 30 verificaciones se midió un promedio de 54.91 ± 2.79 s/pieza (IC95 %: 53.87–55.95 s). En cambio, los 180 s/pieza de machueleado constituyen una estimación operativa no cronometrada. Bajo el supuesto explícito de ejecución secuencial por un solo operador, sin solapamientos ni tiempos auxiliares, ambos valores conducen a un ciclo combinado estimado de 234.91 s/pieza (3.92 min/pieza) y a una capacidad teórica de 15.33 piezas/h; la verificación representaría el 23.38 % de ese tiempo. La velocidad nominal de la prensa (120 golpes/min) describe otra operación y no permite inferir el rendimiento de la estación ni de la línea. Se requieren mediciones del ciclo integral, disponibilidad, estaciones paralelas, inventario intermedio y producción efectiva por turno para evaluar el impacto real sobre la productividad.

Evaluación económica

La inversión aproximada de $2,000 MXN se comparó con el escenario de incorporar un inspector adicional por $100,000 MXN anuales. Bajo el supuesto de que este costo sería totalmente evitable

CC BY NC ND

y sin incluir mantenimiento, capacitación, energía, inflación, impuestos ni valor temporal del dinero, el ROI simple del primer año es [(100,000-2,000)/2,000]×100 = 4,900 %, mientras que el periodo de recuperación es 2,000/100,000 = 0.02 años, aproximadamente 7.3 días calendario. Estos indicadores describen un escenario de decisión condicionado y no un ahorro contable observado como se observa en la Tabla 7.

Tabla 7. Escenario de incorporación de un inspector

Concepto	Valor
Inversión del dispositivo Poka-Yoke	$2000 MXN
Costo estimado de un inspector (anual)	$100000 MXN
Tipo de inversión	Única
Beneficio esperado	Prevención y reducción de riesgo de liberación del defecto

Relación con Lean Manufacturing y Error Proofing

La incorporación del dispositivo en la propia estación responde al principio Lean de calidad en la fuente. En lugar de depender de una inspección posterior, la condición geométrica se verifica antes de que el componente continúe, lo que disminuye la posibilidad de generar actividades sin valor agregado asociadas con segregación, retrabajo, devolución o análisis de reclamaciones. El mecanismo también favorece la estandarización porque transforma un criterio visual susceptible a variación del operador en una condición física de aceptación o rechazo.

Desde Error Proofing, el valor de la solución no reside únicamente en detectar una pieza incorrecta, sino en limitar físicamente su avance. Esta característica diferencia al Poka-Yoke de una inspección convencional: la respuesta se integra al método de trabajo y reduce la dependencia de la memoria o atención del operador. No obstante, la eficacia del dispositivo debe comprobarse periódicamente, ya que desgaste, holguras, contaminación o ajustes incorrectos pueden modificar su respuesta a lo largo del tiempo.

Implicaciones para Quality 4.0

La solución mecánica puede considerarse una etapa de madurez previa a una arquitectura digital más compleja. La información generada por la validación, conteos de piezas, clasificación VP-VN-FP-FN, eventos de falla y tiempos, constituye una base que posteriormente puede digitalizarse mediante sensores, captura automática o tableros de seguimiento. De este modo, la contribución del Poka-Yoke no se contrapone a Quality 4.0; proporciona una condición de proceso estandarizada sobre la cual pueden incorporarse tecnologías de monitoreo y analítica.

Esta perspectiva es relevante para organizaciones que requieren mejorar la calidad con restricciones de inversión. La adopción gradual permite priorizar primero la eliminación física de un modo de falla y, cuando el riesgo o el volumen lo justifiquen, incorporar tecnologías de inspección automática. La decisión debe sustentarse en el costo de no calidad, la criticidad del defecto, la estabilidad del proceso y la capacidad de mantener la solución a lo largo de su vida útil.

Alcance y reproducibilidad

La reproducibilidad del estudio depende de describir con claridad el defecto objetivo, el punto de inspección, la lógica de aceptación, el volumen observado y los criterios de validación. El procedimiento utilizado puede transferirse a otros componentes estampados siempre que exista una característica geométrica susceptible de ser comprobada mediante contacto, posicionamiento o interferencia controlada. No obstante, las dimensiones del dispositivo, tolerancias y frecuencia de verificación deben ajustarse a cada número de parte.

CC BY NC ND

El diseño antes-después aporta evidencia práctica del cambio observado, pero no controla simultáneamente todas las fuentes de variación. Cambios de lote, herramienta, operador, materia prima o mantenimiento pueden coincidir con la intervención. Por ello, el estudio evita atribuir causalidad absoluta y concentra sus conclusiones en la asociación temporal entre la implementación del Poka-Yoke y la ausencia de fugas documentadas durante el seguimiento. Esta delimitación mejora la consistencia entre el método, los resultados y las conclusiones.

Discusión con la literatura

Los hallazgos son congruentes con Widjajanto et al. (2020), quienes describen Poka-Yoke como una estrategia de prevención de errores compatible con Industria 4.0. Asimismo, el traslado de la detección hacia la fuente coincide con los principios de Zero Defect Manufacturing expuestos por Powell et al. (2022) y Psarommatis et al. (2024). A diferencia de enfoques centrados en visión artificial o analítica avanzada, el caso muestra que una solución mecánica puede atender un modo de falla específico con baja inversión, aunque su desempeño debe interpretarse dentro de los límites del diseño preexperimental.

La contribución del estudio consiste en relacionar tres evidencias diferentes: los registros de producción permiten describir las fugas documentadas; las pruebas controladas con piezas patrón cuantifican los errores de clasificación; y el seguimiento de incidencias caracteriza el funcionamiento del mecanismo. Su convergencia fortalece la evaluación del control, pero ninguna fuente sustituye a las otras ni demuestra por sí sola ausencia permanente de defectos.

La disminución de incidencias durante los cinco meses es compatible con una estabilización operacional progresiva, aunque el diseño sin grupo control impide establecer una relación causal. Los registros de fallas y paros describen la continuidad operativa del mecanismo, mientras que las pruebas con piezas patrón cuantifican su capacidad de clasificación. En cuanto al desempeño temporal, los 54.91 s/ciclo corresponden a una verificación medida directamente; los 180 s/pieza de machueleado son una estimación operativa sin cronometraje documentado. Por ello, el ciclo combinado de 234.91 s/pieza es exclusivamente teórico bajo ejecución secuencial y no permite determinar la productividad efectiva. Para evaluar su impacto sobre el flujo real se requieren mediciones del roscado y del ciclo integral, así como registros de producción por turno y disponibilidad de la estación.

Interpretación de los resultados

La inspección de toda la producción no equivale a detección perfecta: los falsos negativos de la prueba controlada justifican comprobaciones periódicas con piezas patrón y seguimiento de discrepancias por operador.

La velocidad nominal de la prensa corresponde exclusivamente al estampado, mientras que el tiempo de verificación caracteriza una operación posterior; por ello, ambos indicadores no permiten inferir la productividad global sin mediciones integrales del flujo productivo. De igual manera, el ROI y el periodo de recuperación se basan en el supuesto de evitar el costo de inspección manual adicional y no constituyen ahorros contables comprobados. La productividad efectiva y el beneficio económico real requieren validación mediante registros operativos y financieros de planta.

CONCLUSIONES

La implementación del Poka-Yoke permitió integrar la prevención del defecto en la fuente. La línea base fue de 630 piezas no conformes en aproximadamente 35,000 componentes mensuales (1.8

CC BY NC ND

%). En el seguimiento post-implementación de cinco meses y 175,000 piezas no se documentaron fugas del defecto de ausencia de barreno; el límite superior binomial unilateral del 95 % para cero eventos fue aproximadamente 17.1 ppm, por lo que el resultado se interpreta como ausencia de fugas observadas y no como una tasa poblacional absoluta de 0 %.

El cronometraje de 30 verificaciones individuales registró 54.91 ± 2.79 s/ciclo (IC95 %: 53.87–55.95 s), mientras que los 180 s/pieza atribuidos al machueleado son una estimación operativa. Su suma, 234.91 s/pieza, y la capacidad teórica derivada de 15.33 piezas/h solo son aplicables bajo ejecución secuencial sin solapamientos ni tiempos auxiliares; no representan productividad medida. La velocidad nominal de estampado de 120 golpes/min corresponde a una etapa distinta. En la validación R&R por atributos se efectuaron 1,200 evaluaciones con 200 piezas patrón, tres operadores y dos repeticiones: 591 verdaderos positivos, 600 verdaderos negativos, nueve falsos negativos y ningún falso positivo. La sensibilidad fue de 98.50 %, la especificidad de 100.00 % y la exactitud de 99.25 %. Por tanto, la cobertura de inspección del 100 % no equivale a detección infalible.

La evaluación de confiabilidad operacional registró 54 fallas del dispositivo, 27 paros atribuibles al Poka-Yoke, 11 ajustes no programados y nueve intervenciones de mantenimiento correctivo durante cinco meses. Las incidencias totales disminuyeron de 38 en el primer mes a cuatro en el quinto, equivalente a una reducción descriptiva del 89.5 %. En el último mes se registraron tres fallas, un paro y ningún ajuste no programado ni mantenimiento correctivo. La tendencia observada es consistente con una estabilización progresiva del dispositivo, sin implicar ausencia absoluta de fallas ni causalidad debido al carácter preexperimental del estudio.

El análisis económico mostró que, bajo los supuestos declarados, una inversión aproximada de $2,000 MXN frente a un costo anual estimado de $100,000 MXN para inspección adicional produce un ROI simple de 4,900 % y una recuperación de la inversión de 0.02 años. Estos valores deben interpretarse como un escenario económico condicionado y no como rentabilidad financiera ajustada por riesgo.

Como limitaciones, el estudio corresponde a un solo número de parte, carece de grupo control y depende de registros industriales. Se recomienda replicar la evaluación en otras familias de componentes, ampliar el seguimiento longitudinal y mantener de forma sistemática los conteos de la matriz de detección, las repeticiones funcionales, los tiempos de verificación y los registros de paros, ajustes, fallas y mantenimiento. Estas acciones permitirán fortalecer la validez externa y facilitar futuras integraciones con sensores o visión artificial.

REFERENCIAS

Antony, J., McDermott, O., & Sony, M. (2022). Quality 4.0 conceptualisation and theoretical understanding: a global exploratory qualitative study. The TQM Journal, 34(5), 1169–1188. https://doi.org/10.1108/TQM-07-2021-0215

Antony, J., McDermott, O., Sony, M., Toner, A., Bhat, S., Cudney, E., & Doulatabadi, M. (2023). Benefits, challenges, critical success factors and motivations of Quality 4.0: A qualitative global study. Total Quality Management & Business Excellence, 34(7–8), 827–846. https://doi.org/10.1080/14783363.2022.2113737

Antony, J., Sony, M., Furterer, S., McDermott, O., & Pepper, M. (2022). Quality 4.0 and its impact on organizational performance: An integrative viewpoint. The TQM Journal, 34(6), 2069–2084. https://doi.org/10.1108/TQM-08-2021-0242

Antony, J., Sony, M., McDermott, O., Jayaraman, R., & Flynn, D. (2023). An exploration of organizational readiness factors for Quality 4.0: An intercontinental study and future research directions. International Journal of Quality & Reliability Management, 40(2), 582–606. https://doi.org/10.1108/IJQRM-10-2021-0357

Brandenburger, J., Schirm, C., Melcher, J., Hancke, E., Vannucci, M., Colla, V., Cateni, S., Sellami, R., Dupont, S., Majchrowski, A., & Arteaga, A. (2020). Quality4.0—Transparent product quality supervision in the age of Industry 4.0. arXiv. https://arxiv.org/abs/2011.06502

Gal, B., Madreiter, T., Scheder, N., Liesinger, E., Hold, P., & Schlund, S. (2024). Expanding the boundaries of Zero-Defect Manufacturing: A systematic literature review. Procedia CIRP, 122, 336–341. https://doi.org/10.1016/j.procir.2024.01.050

Hernández Chávez, G., & Hernández Chávez, Y. (2024). ¿Qué es la Calidad 4.0? Una revisión de la literatura. Ingeniería Industrial, 46, 129–149. https://doi.org/10.26439/ing.ind2024.n046.6890

Hoffmann, R., & Reich, C. (2023). A systematic literature review on artificial intelligence and explainable artificial intelligence for visual quality assurance in manufacturing. Electronics, 12(22), 4572. https://doi.org/10.3390/electronics12224572

Hossain, M. M., & Purdy, G. (2024). Role of Industry 4.0 in zero-defect manufacturing: A systematic literature review and a conceptual framework for future research directions. Manufacturing Letters, 41, 1696–1707. https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2024.09.197

Markatos, N. G., & Mousavi, A. (2023). Manufacturing quality assessment in the industry 4.0 era: A review. Total Quality Management & Business Excellence, 34(13–14), 1655–1681. https://doi.org/10.1080/14783363.2023.2194524

Pachimuthu, D., Pinzone, M., & Taisch, M. (2024). Assessing Zero-Defect Manufacturing maturity: A review of the state of the art. IFAC-PapersOnLine, 58(19), 899–904. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2024.09.167

Powell, D., Magnanini, M. C., Colledani, M., & Myklebust, O. (2022). Advancing Zero Defect Manufacturing: A state-of-the-art perspective and future research directions. Computers in Industry, 136, 103596. https://doi.org/10.1016/j.compind.2021.103596

Psarommatis, F., May, G., & Azamfirei, V. (2024). Zero defect manufacturing in 2024: A holistic literature review for bridging the gaps and forward outlook. International Journal of Production Research, 64(17), 7395–7431. https://doi.org/10.1080/00207543.2024.2388217

Saihi, A., Awad, M. M., & Ben-Daya, M. (2023). Quality 4.0: Leveraging Industry 4.0 technologies to improve quality management practices—a systematic review. International Journal of

CC BY NC ND

Quality & Reliability Management, 40(2), 628–650. https://doi.org/10.1108/IJQRM-09-2021-0305

Sony, M., Antony, J., & Douglas, J. A. (2020). Essential ingredients for the implementation of Quality 4.0: A narrative review of literature and future directions for research. The TQM Journal, 32(4), 779–793. https://doi.org/10.1108/TQM-12-2019-0275

Sony, M., Antony, J., Douglas, J. A., & McDermott, O. (2021). Motivations, barriers and readiness factors for Quality 4.0 implementation: An exploratory study. The TQM Journal, 33(6), 1502–1515. https://doi.org/10.1108/TQM-11-2020-0272

Souza, F. F., Corsi, A., Pagani, R. N., Balbinotti, G., & Kovaleski, J. L. (2022). Total Quality Management 4.0: Adapting quality management to Industry 4.0. The TQM Journal, 34(4), 749–769. https://doi.org/10.1108/TQM-10-2020-0238

Widjajanto, S., Purba, H. H., & Jaqin, S. C. (2020). Novel Poka-Yoke approaching toward Industry 4.0: A literature review. Operational Research in Engineering Sciences: Theory and Applications, 3(3), 65–83. https://doi.org/10.31181/oresta20303065w

CC BY NC ND