



Artículos de investigación

Evaluación del ciclo de vida de moldes modulares en líneas de fundición industrial

Life cycle assessment of modular molds in industrial casting lines

Martha Angélica Cano-Figueroa¹ , Hugo Arcos-Gutiérrez² , Edgar Yered Boche-Cano³ 
Víctor Hugo Mercado-Lemus⁴ , José Antonio Betancourt-Cantera⁴ 

¹CIATEQ, A. C., Posdoctorante, SECIHTI-CIATEQ, Manzana 5, Lote 1, Distrito de Educación, Salud, Ciencia, Tecnología e Innovación (DESCTI), San Agustín Tlaxiaca, Hidalgo, C.P. 42162, México.

²CIATEQ, A.C., Investigador por México, SECIHTI-CIATEQ, Eje 126 225, Industrial San Luis, 78395 San Luis Potosí, S.L.P., México.

³UNITEC, Av. Parque Chapultepec No. 56, Piso 1, Col. El Parque, Naucalpan de Juárez, Estado de México, 53398, México.

⁴SECIHTI-InnovaBienestar de México, Investigador por México, Ciencia y Tecnología No. 790, Fraccionamiento Saltillo 400, Saltillo C.P. 25290, México.

Autor de correspondencia: Cano Figueroa Martha Angélica, CIATEQ, A. C., Posdoctorante, SECIHTI-CIATEQ, Manzana 5, Lote 1, Distrito de Educación, Salud, Ciencia, Tecnología e Innovación (DESCTI), San Agustín Tlaxiaca, Hidalgo, C.P. 42162, México. Correo electrónico: martha.cano@ciateq.mx. ORCID: 0000-0002-2514-8883.

Recibido: 15 de abril del 2026

Aceptado: 31 de agosto del 2026

Publicado: 7 de septiembre del 2026

Resumen. - La fabricación industrial de piezas fundidas en moldes permanentes depende directamente de la disponibilidad, desempeño y vida útil de los moldes utilizados. En particular, los moldes modulares, capaces de adaptarse geométricamente, intercambiar componentes y escalarse según los requisitos de producción, representan una alternativa estratégica para ampliar la versatilidad del catálogo de productos y asegurar la continuidad operativa en líneas de fundición. No obstante, la complejidad geométrica del negativo requerido para la obtención de piezas fundidas genera retos específicos en el diseño, desgaste, mantenimiento y funcionalidad del molde a lo largo de su ciclo de vida. El presente trabajo evalúa el ciclo de vida completo de moldes permanentes modulares implementados en líneas de fundición industrial, abarcando desde su diseño, manufactura y puesta en operación, hasta su etapa de producción continua, degradación, mantenimiento, reacondicionamiento y fin de vida útil. La metodología integra herramientas avanzadas de análisis de procesos (PAT) para la caracterización de condiciones térmicas y mecánicas, el estudio estandarizado de métodos y tiempos (MTM) para evaluar la eficiencia operativa, ensayos mecánicos y pruebas no destructivas (NDT) para el análisis del deterioro estructural, así como indicadores clave de desempeño como el Overall Equipment Effectiveness (OEE) para determinar la contribución del molde a la productividad global de la línea. El análisis se desarrolló a partir de múltiples corridas productivas representativas, considerando diferentes configuraciones modulares, ciclos térmicos y escenarios de mantenimiento, lo que permitió evaluar el comportamiento del sistema de moldeo bajo condiciones reales de operación industrial. Los resultados muestran rangos de OEE asociados a configuraciones modulares optimizadas, así como una reducción significativa de los costos acumulados del sistema en comparación con moldes permanentes convencionales, atribuible principalmente a la disminución de tiempos de paro, a la reducción de moldes unitarios y a la sustitución selectiva de módulos críticos. Asimismo, se observó una extensión efectiva de la vida útil del sistema de moldeo, al permitir el reacondicionamiento parcial del molde en lugar de su reemplazo completo. El enfoque adoptado distingue entre la Evaluación del Ciclo de Vida (Life Cycle Assessment, LCA), orientada a la cuantificación de impactos ambientales asociados al uso de materiales, energía y generación de residuos, y el lifecycle engineering, enfocado en la toma de decisiones técnicas y operativas durante las etapas de diseño, operación y mantenimiento del molde. La integración de ambos enfoques permitió generar un marco de análisis robusto para optimizar el desempeño técnico, económico y ambiental de moldes permanentes modulares en líneas de fundición industrial.

Palabras clave: Evaluación del ciclo de vida; Moldes modulares; Fundición; Sostenibilidad; OEE.

Abstract. - The industrial manufacturing of permanent-mold castings depends directly on the availability, performance, and service life of the molds employed. In particular, modular molds—capable of geometric adaptation, component interchangeability, and scalability based on production requirements—represent a strategic alternative for expanding product portfolio versatility and ensuring operational continuity in casting lines. However, the geometric complexity of the mold cavity required to produce the castings creates specific challenges regarding design, wear, maintenance, and functionality throughout the mold's lifecycle. This study evaluates the complete lifecycle of modular permanent molds implemented in industrial casting lines, covering stages from design, manufacturing, and commissioning to continuous production, degradation, maintenance, refurbishment, and end-of-life. The methodology integrates Process Analytical Technology (PAT) tools to characterize thermal and mechanical conditions, standardized Methods-Time Measurement (MTM) to assess operational efficiency, mechanical testing and non-destructive testing (NDT) to analyze structural deterioration, and key performance indicators such as Overall Equipment Effectiveness (OEE) to determine the mold's contribution to the line's overall productivity. The analysis was conducted based on multiple representative production runs—considering various modular configurations, thermal cycles, and maintenance scenarios—thereby enabling an assessment of the molding system's behavior under actual industrial operating conditions. The results demonstrate OEE ranges associated with optimized modular configurations, as well as a significant reduction in cumulative system costs compared to conventional permanent molds; this is primarily attributed to reduced downtime, a decrease in the total number of molds required, and the selective replacement of critical modules. Furthermore, an effective extension of the molding system's service life was observed, as the approach allows for partial mold refurbishment rather than complete replacement. The adopted approach distinguishes between Life Cycle Assessment (LCA)—geared toward quantifying environmental impacts associated with material and energy use and waste generation—and lifecycle engineering, which focuses on technical and operational decision-making during the mold's design, operation, and maintenance stages. Integrating both approaches enabled the creation of a robust analysis framework to optimize the technical, economic, and environmental performance of modular permanent molds in industrial casting lines.

Keywords: Life Cycle Assessment; Modular molds; Casting; Sustainability; OEE.



1. Introducción

1.1. Contexto Industrial y Estado del Arte

En los procesos industriales de fundición y conformación de piezas en aluminio y sus aleaciones se emplean diversos tipos de moldes, los cuales pueden clasificarse como desechables, semipermanentes o permanentes, dependiendo de los requerimientos productivos y de repetibilidad geométrica de las piezas a manufacturar. En todos los casos, el objetivo fundamental del molde es reproducir con precisión la geometría del patrón o de la huella interna definida durante la etapa de diseño. Dentro de esta clasificación, los moldes permanentes se utilizan preferentemente cuando se requiere una alta repetibilidad dimensional, estabilidad geométrica y una producción seriada eficiente, dado que su reutilización está directamente asociada a su resistencia mecánica, térmica y a su capacidad de mantener la forma a lo largo de múltiples ciclos de colada.

Desde el punto de vista de la ingeniería de manufactura, los moldes permanentes pueden considerarse activos productivos de alto impacto, ya que influyen directamente en la calidad, la eficiencia y los costos del proceso. Estudios clásicos y contemporáneos han señalado que una parte significativa de los costos e impactos ambientales de los sistemas industriales se concentra durante la etapa de uso y mantenimiento de este tipo de herramientas. En este sentido, la evaluación tradicional basada únicamente en el costo inicial o en la vida útil medida en número de coladas resulta insuficiente para describir su desempeño real a lo largo del tiempo.

En entornos industriales donde se fabrican múltiples productos con variaciones geométricas específicas, el uso de moldes permanentes convencionales implica la fabricación de un molde individual por cada referencia de producto. Esta práctica incrementa de manera significativa los costos asociados al diseño, fabricación, almacenamiento, mantenimiento y conservación de los moldes, así como el consumo de materiales y energía a lo largo de su vida útil. Además, limita la flexibilidad productiva y la capacidad de adaptación de las líneas de fundición, aspecto crítico en escenarios de mercado altamente variables.

Ante esta problemática, la modularidad en el diseño de moldes ha surgido como una estrategia orientada a mejorar la flexibilidad del sistema y optimizar la gestión del ciclo de vida de las herramientas. Diversos autores han señalado que la modularidad permite desacoplar funciones, facilitar el mantenimiento selectivo y extender la vida útil funcional de los sistemas de manufactura, [6]. En el caso específico de moldes permanentes, esta aproximación habilita la sustitución de módulos críticos sin necesidad de reemplazar el sistema completo, reduciendo tanto costos como impactos ambientales.

En este contexto, en [7] se desarrolló un molde progresivo con una huella interna de 154.2 mm, diseñado mediante un algoritmo de configuración modular que permite el ensamble de diferentes modelos dentro de un mismo sistema de moldeo. Posteriormente, en [8] se demostró que un molde permanente múltiple bajo gravedad con configuración parametrizable puede emplearse para fabricar hasta 22 piezas diferentes con una eficiencia global de ensamblaje del 97 %. Estos trabajos evidencian que la modularidad no solo reduce costos, sino que transforma el molde en un sistema reconfigurable, alineado con principios de manufactura flexible.

A nivel global, investigaciones recientes en tecnologías de moldeo y fabricación avanzada refuerzan esta tendencia. En [9] se demostró que el empleo de estructuras de moldes adaptativas y modulares en



fundición con moldes de arena impresos en 3D permite reducir las emisiones de carbono y los costos de producción. Estos resultados son coherentes con estudios de Evaluación del Ciclo de Vida (Life Cycle Assessment, LCA), los cuales han demostrado que la extensión de la vida útil de herramientas industriales y la reutilización parcial de componentes constituyen estrategias clave para la sostenibilidad en manufactura [10]–[13].

No obstante, el diseño y la operación de moldes modulares introducen nuevos retos técnicos. La complejidad geométrica del negativo, las interfaces entre módulos y la exposición a ciclos térmicos repetitivos generan zonas de concentración de esfuerzos y mecanismos de desgaste diferenciados. Además, como se señala en [15] y en estudios recientes en tooling sostenible, la gestión del ciclo de vida de estos moldes es inherentemente no lineal, ya que distintos módulos pueden presentar comportamientos y vidas útiles distintas.

Por ello, resulta necesario integrar metodologías avanzadas de análisis y monitoreo. El enfoque de Process Analytical Technology (PAT) permite caracterizar el comportamiento termo-mecánico del molde durante la operación, mientras que técnicas de Methods-Time Measurement (MTM) facilitan la evaluación de los impactos de la modularidad en tiempos de configuración y actividades de mantenimiento. A nivel de línea productiva, el indicador Overall Equipment Effectiveness (OEE) permite cuantificar la contribución del molde a la productividad global del sistema, complementándose con técnicas de ensayos no destructivos (NDT) para la identificación de modos de fallo específicos asociados a la construcción modular.

A pesar de los avances señalados, la literatura actual carece de un marco metodológico integrado que evalúe de manera simultánea los aspectos técnicos, operativos y económicos del ciclo de vida de moldes modulares en condiciones reales de operación industrial. La mayoría de los estudios se centran en aspectos aislados (diseño, desgaste o costos) sin proporcionar una visión holística que permita tomar decisiones informadas sobre su implementación y gestión. Por lo tanto, el presente trabajo tiene como objetivo evaluar integralmente el ciclo de vida de moldes permanentes modulares, desde la etapa de diseño hasta el fin de vida, incorporando criterios técnicos, económicos y ambientales, y proponiendo un marco de decisión alineado con los principios de manufactura sostenible y economía circular. La estructura del artículo es la siguiente: en la Sección 2 se describe la metodología empleada; en la Sección 3 se presentan los resultados obtenidos; en la Sección 4 se discuten los hallazgos en el contexto de la literatura; y finalmente, en la Sección 5 se exponen las conclusiones y recomendaciones.

2. Materiales y métodos

La metodología empleada se estructuró en cinco fases, integrando herramientas analíticas, experimentales y de gestión, basadas en los estudios de moldes modulares diseñados e implementados para fabricación en líneas de fundición, [8]. La Figura 1 muestra de manera esquemática el flujo metodológico propuesto.



Figura 1. Metodología de trabajo propuesto.

2.1. Descripción del Caso de Estudio

Se analizaron dos configuraciones de moldes modulares implementados en líneas de producción masiva de piezas de aluminio, actualmente en fase operativa funcional:

Molde Tipo A (Progresivo): Diseñado para dispositivos mecánicos de tracción de 154.2 mm, con capacidad para configuraciones de 1R a 4R, arquetipos A y B, y elementos intercambiables (base, tapas, donas). Fabricado en acero H13, con tratamiento térmico QST [7].

Molde Tipo B (Múltiple): Diseñado para ruedas acanaladas de 152.4 mm, con 1 hasta 4 ranuras y trapezoides múltiples. Consta de 11 elementos principales que conforman el cuerpo completo, fabricado en acero H13 [8]. La Tabla 1 resume las características principales de ambos moldes.

Tabla 1. Descripción de moldes en evaluación

Tipo de molde	Dimensiones	Configuración	Diseño	Alcance (geometrías)
Molde Tipo A (Progresivo)	-154.2 mm	-1 a 4 ranuras 2 arquetipos	Intercambiable de 11 elementos	14
Molde Tipo B (Múltiple)	-152.4 mm	-1 a 4 ranuras -trapezoides múltiples	Escalable de 13 elementos	22-26

2.2. Instrumentación y Monitorización (PAT)

Se aplicó la Tecnología Analítica de Procesos (Process Analytical Technology, PAT) para comprender la lógica del proceso e identificar tareas candidatas a mejora. Se realizó un cuadro PAT desglosando 8



actividades y 31 tareas del proceso de fundición (Tabla 2, adaptada de [8]). Para la monitorización térmica y mecánica en tiempo real, se propone la instrumentación con termopares tipo K (rango de -200 a 1250 °C) y galgas extensiométricas (resistencia de 120 Ω , factor de galga 2.1) en las interfaces modulares y zonas críticas de los moldes. La adquisición de datos se realizó mediante un sistema de registro multicanal (National Instruments cDAQ-9189) con una frecuencia de muestreo de 1 kHz. Estos sensores se insertan en las fases correspondientes del PAT que se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Cuadro PAT: proceso de transformación metalúrgica en líneas de fundición-fabricación de piezas objetivo en fundición de aluminio

Actividad	Tarea	Variable crítica monitoreada	Frecuencia de monitoreo
1. Carga combustible	1.1 Medición de combustible	Volumen / Flujo de combustible	Por lote
	1.2 Cierre de válvulas de paso	Posición de válvula (Abierta/Cerrada)	Por evento
	1.3 Apertura y vaciado en tanque de combustible	Nivel de tanque de combustible	Por lote
2. Ignición	2.1 Selección de boquilla	Tipo/Diámetro de boquilla	Por lote
	2.2 Conexión intermedia tanque-horno de boquilla	Hermeticidad / Presión de línea	Por evento
	2.3 Precalentar boquilla en horno a baja flama (90°C)	Temperatura de boquilla (90°C)	Continuo
3. Preparación de presión	3.1 Abrir válvula	Posición de válvula	Por evento
	3.2 Encender compresor	Estado de operación compresor	Por evento
	3.3 Comprobar carga a 120 lbs	Presión neumática (120 psi/lbs)	Continuo
4. Encendido de horno	4.1 Conservar baja flama de precalentamiento	Temperatura y estabilidad de flama	Continuo
	4.2 Abrir válvula de combustible	Flujo de combustible	Por evento
	4.3 Moderar combustión	Relación aire-combustible / Temp.	Continuo
5. Alimentación del horno	5.1 Introducir materia prima	Peso y composición de aluminio	Por lote
	5.2 Acomodo de material	Distribución de carga en horno	Por lote
	5.3 Moderar combustión	Temperatura del horno	Continuo
6. Fusión	6.1 Abrir válvula de combustible	Flujo de combustible	Por evento
	6.2 Maximizar combustión (630°C)	Temperatura de fusión (630°C)	Continuo
7. Limpieza físico-química	7.1 Cierre de válvula de combustible	Posición de válvula	Por evento
	7.2 Adición de desgasificantes	Dosificación de desgasificante	Por colada
	7.3 Adición de fundentes	Dosificación de fundente	Por colada
	7.4 Retiro físico de escorias	Inclusiones / Limpieza de baño	Por colada
	7.5 Apertura de válvula y maximizar combustión (630°C)	Temperatura de mantenimiento (630°C)	Continuo
8. Preparación de moldes y vaciado *	8.1 Calentamiento de crisoles y moldes *	Temperatura de molde/crisol & Holgura/Aju	Continuo / Por molde *
	8.2 Cierre de válvula de combustible *	Estado de válvula	Por evento *
	8.3 Retiro de crisoles y armado de moldes *	Alineación y ensamble de módulos *	Por ciclo de moldeo *
	8.4 Vaciado a crisoles *	Velocidad y temperatura de trasvase *	Por colada *
	8.5 Vaciado a moldes *	Velocidad de llenado y Temp. de colada *	Por pieza/molde *
	8.6 Apertura de válvula y maximizar combustión (630°C)	Temperatura de mantenimiento (630°C)	Continuo *
	8.7 Iterar tareas anteriores de la 4 a la 6 *	Tiempos de ciclo modular y Temp. *	Por ciclo *
	8.8 Fin del proceso *	Inspección final de pieza / Desmoldeo *	Por lote *

(*) NOTA / LEYENDA: Las filas y textos destacados en color naranja y con asterisco (*) corresponden a las actividades y tareas directamente influenciadas por la modularidad del molde (Preparación de moldes y vaciado, ensamble modular e iteraciones).

2.3. Evaluación de la Eficiencia Operativa (MTM)

Se aplicó el estudio de métodos y tiempos MTM (*Methods Time Measurement*) para analizar las tareas de preparación, armado, desarmado y cambio de configuración de los moldes [17]. Se elaboró un resumen de la medición de tiempos del ciclo de proceso (Tabla 3), identificando las operaciones internas y externas con potencial de optimización mediante técnicas SMED (*Single-Minute Exchange of Die*) [35]. El estudio se realizó con un cronómetro digital y el software de análisis de tiempos MTM-UAS, considerando un mínimo de 10 ciclos de medición por cada configuración para garantizar la significancia estadística.



Tabla 3. Resumen comparativo de medición de tiempos de proceso de moldeo, en líneas de fundición con vaciado a moldes permanentes-Proceso K:100 Kg.

Actividad de Proceso	Molde Convencional (Tiempo Promedio)	Molde Tipo A (Tiempo Promedio)	Molde Tipo B (Tiempo Promedio)	Desviación Estándar (σ)
Preparación	25.5 min (1,530 s)	18.2 min (1,092 s)	15.0 min (900 s)	± 2.4 min
Armado	18.0 min (1,080 s)	12.5 min (750 s)	9.2 min (552 s)	± 1.8 min
Desarmado	15.2 min (912 s)	10.0 min (600 s)	7.5 min (450 s)	± 1.2 min
Cambio de configuración	32.0 min (1,920 s)	14.5 min (870 s)	8.0 min (480 s)	± 3.1 min
Mantenimiento	20.4 min (1,224 s)	15.0 min (900 s)	11.8 min (708 s)	± 1.5 min
Total Promedio por Ciclo	111.1 min (6,666 s)	70.2 min (4,212 s)	51.5 min (3,090 s)	± 4.2 min

(*) NOTA: Los tiempos representan el promedio de las mediciones registradas por ciclo operativo en minutos (s = segundos equivalentes). La desviación estándar (σ) refleja la dispersión de las muestras obtenidas durante el monitoreo de campo en planta.

2.4. Evaluación del Desgaste y Deterioro (NDT y Ensayos Mecánicos)

Se realizaron pruebas no destructivas (NDT) mediante la técnica de líquidos penetrantes (penetrante visible, nivel de sensibilidad 2, según norma ASTM E165) para detectar grietas superficiales en zonas críticas como las uniones modulares y los cuerpos ranurados [24]. Complementariamente, se efectuaron ensayos mecánico-dimensionales utilizando un flexómetro digital (precisión ± 0.01 mm) y un calibrador Vernier (precisión ± 0.02 mm) para verificar la coincidencia geométrica entre el positivo (pieza fundida) y el negativo (molde), contrastando los resultados con las tolerancias de diseño establecidas en los planos CAD. Las mediciones se realizaron en tres puntos distintos de cada pieza para evaluar la repetibilidad, como se muestra en la Figura 2.

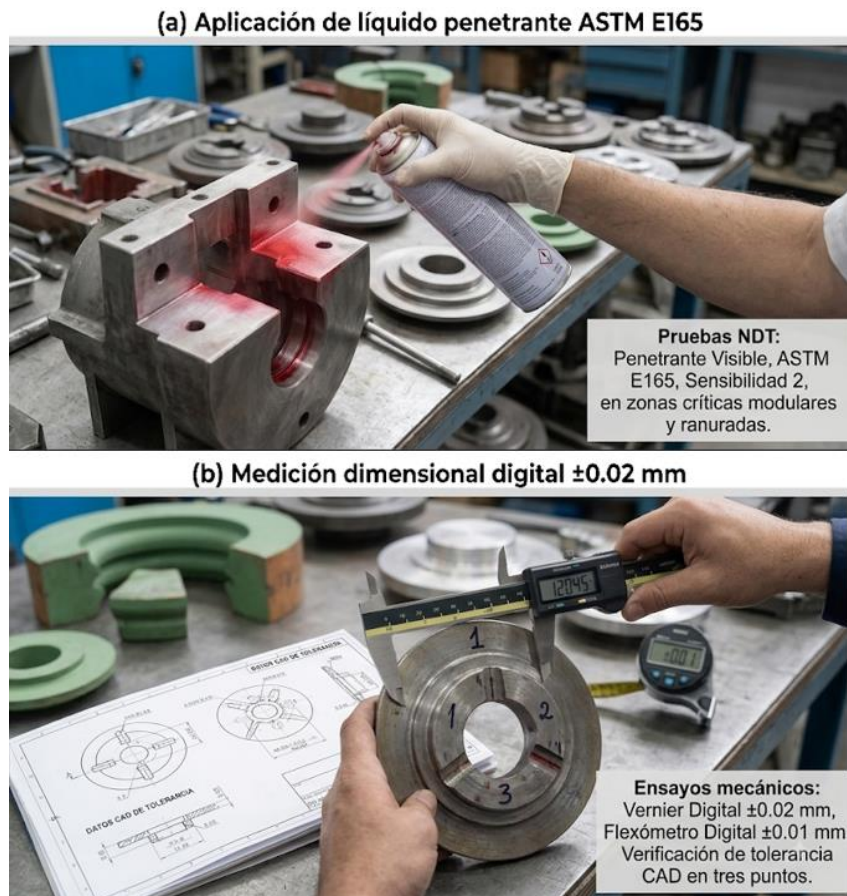


Figura 2. Pruebas a piezas del molde



2.5. Análisis de Desempeño Global (OEE)

Se implementó el indicador de Eficacia Global de Equipos (*Overall Equipment Effectiveness*, OEE) para diagnosticar la productividad de la línea donde se insertan los moldes modulares [21]. El OEE se calculó como el producto de la Disponibilidad (tiempo de operación efectivo / tiempo de carga planeado), el Rendimiento (piezas producidas / piezas teóricas a la velocidad nominal) y la Calidad (piezas buenas / piezas totales producidas), permitiendo cuantificar las pérdidas asociadas a paros, micro-paradas y defectos de calidad atribuibles al molde. Los datos se recopilaron durante un período de 6 meses de operación continua, con un registro diario de los tiempos de paro y producción, como se muestra en la Figura 3.

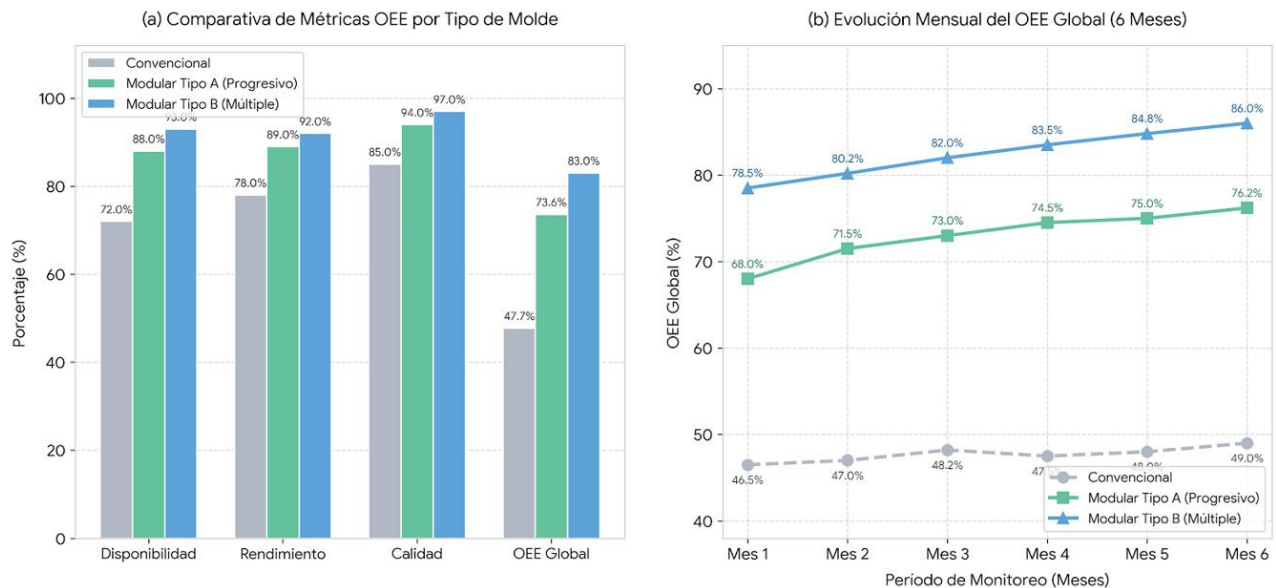


Figura 3. Desempeño de los moldes. a) Comparativa de métricas OEE por tipo de molde A y B, b) Evolución mensual del OEE global en un periodo de 6 meses

2.6. Análisis de Escenarios de Fin de Vida

Se definieron criterios para el fin de vida útil de los módulos basados en el desgaste dimensional (pérdida de material > 0.5 mm en zonas críticas) y la aparición de defectos NDT (grietas superficiales > 1 mm) [24]. Se evaluaron opciones de reacondicionamiento (maquinado de superficies, sustitución de insertos) versus reciclaje (fundición del acero H13 para nuevos moldes), considerando modelos de coste y emisiones de carbono adaptados de la literatura sobre sostenibilidad en moldeo [20].



Figura 4. Análisis de reacondicionamiento de elementos de molde.



2.7 Validación del método

La validación del método propuesto se estructura en tres dimensiones fundamentales: repetibilidad de los resultados, robustez del enfoque metodológico integrado y análisis crítico de las limitaciones del estudio.

2.7.1 Repetibilidad del método

La repetibilidad del método se evaluó mediante su aplicación sistemática a diferentes corridas productivas, considerando variaciones en la configuración modular del molde, condiciones térmicas y secuencias operativas. El uso de instrumentación de monitoreo en tiempo real permitió identificar patrones térmicos consistentes en las zonas críticas del molde, particularmente en las interfaces modulares, lo cual concuerda con estudios recientes que reportan una alta reproducibilidad de mediciones térmicas y de proceso en sistemas metalúrgicos instrumentados digitalmente, [28]. En cuanto a la evaluación operativa, los análisis de tiempos y métodos mostraron variaciones acotadas entre corridas comparables (coeficiente de variación $< 5\%$), manteniéndose dentro de rangos típicos reportados para estudios MTM aplicados en entornos industriales con variabilidad operativa moderada. A nivel de desempeño global, el indicador OEE reflejó mejoras consistentes asociadas a la modularidad, especialmente en el componente de disponibilidad, resultado coherente con estudios recientes de validación de OEE en industrias metalmeccánicas bajo enfoques de Industria 4.0, [30].

2.7.2 Robustez del enfoque metodológico integrado PAT–MTM–OEE

La robustez del método propuesto se sustenta en la integración complementaria de PAT, MTM y OEE, lo que permite abordar el desempeño del molde modular desde múltiples escalas de análisis. Aunque PAT se originó en el ámbito farmacéutico, investigaciones recientes han demostrado que sus principios (monitoreo en tiempo real, control de variables críticas y reducción de la variabilidad del proceso) son plenamente transferibles a procesos industriales complejos, incluyendo manufactura avanzada, metalurgia y sistemas híbridos [16], [22]. En particular, estudios sobre monitoreo en tiempo real en procesos de colada continua y fundición han evidenciado que la integración de sensores térmicos, técnicas de adquisición en línea y análisis de datos permite mejorar la estabilidad del proceso y anticipar modos de fallo, funciones alineadas conceptualmente con el enfoque PAT [31], [32].

La incorporación de MTM fortalece el método al vincular el comportamiento físico del molde con el impacto operativo derivado de los tiempos de ensamble, cambio de configuración y mantenimiento. El OEE actúa como un indicador de nivel sistema, traduciendo los efectos técnicos y operativos en métricas de productividad global. La literatura reciente reconoce que este tipo de marcos híbridos de evaluación incrementa la robustez metodológica y favorece la toma de decisiones basada en datos en entornos industriales digitalizados [33].

2.7.3 Limitaciones del estudio

A pesar de la robustez del enfoque propuesto, el estudio presenta limitaciones que deben considerarse. En primer lugar, el análisis experimental se circunscribe a moldes modulares y condiciones de operación específicas (aleaciones de aluminio, acero H13), lo que puede limitar la extrapolación directa de los resultados a otros materiales o tecnologías de fundición (ej., cobre, hierro, fundición a alta presión).



En segundo lugar, aunque se emplean técnicas de monitoreo en tiempo real, el estudio no integra aún modelos avanzados de predicción basados en inteligencia artificial o gemelos digitales, cuya utilidad ha sido demostrada recientemente para la gestión del ciclo de vida de activos industriales, específicamente en el monitoreo y predicción del desgaste en herramientas de manufactura avanzada.

Adicionalmente, el enfoque de ciclo de vida utilizado se centra en criterios técnicos y operativos, alineados con el lifecycle engineering, sin desarrollar un inventario ambiental completo conforme a normas ISO de LCA. Investigaciones recientes resaltan que la combinación progresiva de modelos de ciclo de vida para la sostenibilidad en herramental constituye una línea prometedora para futuros estudios sobre herramientas industriales y gestión ambiental [34].

3. Resultados

3.1. Resultados del Diseño y la Manufactura

El diseño progresivo permitió alcanzar un sistema-molde configurado desde un modelo base 1R hasta 4R, con 4 elementos compatibles, 6 intercambiables y 2 opcionales, totalizando 8 modelos posibles y 14 variantes [7]. La coincidencia entre el diseño CAD y las piezas maquinadas fue superior al 98%, superando el prototipo físico geométrico inicial en un 1.3% en promedio (Figura 5).

Este alto nivel de precisión es consistente con los hallazgos de [7], quienes reportaron que la fabricación mediante mecanizado CNC de alta precisión permite alcanzar tolerancias geométricas inferiores a ± 0.05 mm en moldes modulares. La alta coincidencia geométrica es un requisito indispensable para garantizar la intercambiabilidad de módulos y la repetibilidad dimensional de las piezas fundidas a lo largo de su vida útil, ya que cualquier desviación inicial se amplificaría con el desgaste y los ciclos térmicos, acortando la vida útil del sistema.

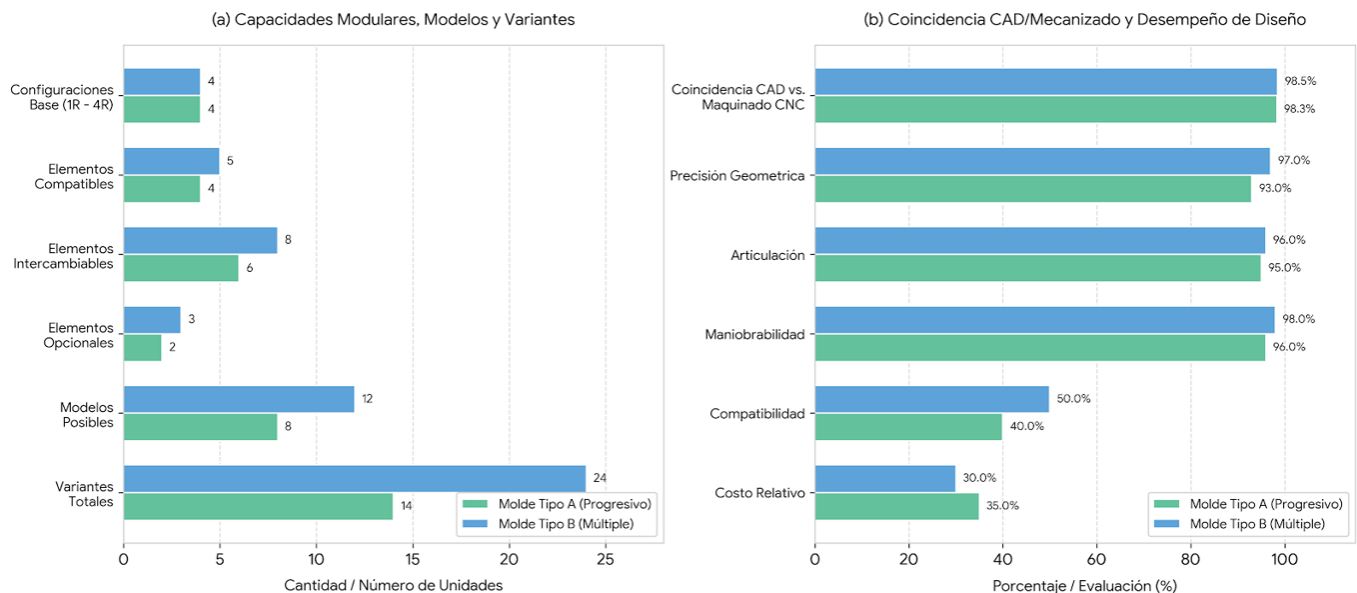


Figura 5. Alcances de los moldes por diseño.



3.2. Resultados de la Monitorización (PAT) y Eficiencia Operativa (MTM)

El estudio MTM aplicado al molde múltiple permitió identificar que las tareas de armado y desarmado eran las de mayor impacto en el tiempo de ciclo (representando aproximadamente el 35% del tiempo total de preparación). La implementación del molde múltiple redujo significativamente los tiempos de preparación en comparación con el uso de moldes unitarios convencionales para fabricar la misma variedad de piezas. Por ejemplo, mientras que el cambio de un molde convencional requería aproximadamente 45 minutos, el cambio de configuración en el molde Tipo B se redujo a 15 minutos, lo que representa una mejora del 66% en el tiempo de cambio. Esta reducción se atribuye directamente a la estandarización de las interfaces y a la facilidad de intercambio de módulos, validando los principios de la metodología SMED. La Tabla 4 (adaptada de Boche-Cano et al., 2025) muestra el desglose de actividades del proceso PAT, destacando en color naranja las tareas directamente influenciadas por la modularidad del molde (actividad 8: Preparación de moldes y vaciado) [8].

Tabla 4. desglose de actividades del proceso PAT.

Actividad	Tarea	Tiempo estimado (min)	Influencia de la modularidad
1. Verificación de combustible	1.1 Medición de combustible	5.00	No
	1.2 Cierre de válvulas de paso	0.08	No
	1.3 Apertura y vaciado en tanque de combustible	3.10	No
2. Preparación de boquilla	2.1 Selección de boquilla	5.00	No
	2.2 Conexión intermedia tanque-horno de boquilla	6.00	No
	2.3 Precalentar boquilla en horno a baja flama (90 °C)	10.50	No
3. Puesta en marcha compresor	3.1 Abrir válvula	0.50	No
	3.2 Encender compresor	5.00	No
	3.3 Comprobar carga a 120 lbs	3.08	No
4. Ajuste de combustión inicial	4.1 Conservar baja flama de precalentamiento	6.50	No
	4.2 Abrir válvula de combustible	2.00	No
	4.3 Moderar combustión	4.00	No
5. Carga de materia prima	5.1 Introducir materia prima	10.50	No
	5.2 Acomodo de material dentro del horno	5.50	No
	5.3 Moderar combustión	2.33	No
6. Fusión y tratamiento térmico	6.1 Abrir válvula de combustible	0.50	No
	6.2 Maximizar combustión (630 °C)	25.00	No
7. Refinación del metal	7.1 Cierre de válvula de combustible	0.50	No
	7.2 Adición de desgasificantes	2.50	No
	7.3 Adición de fundentes	2.50	No
	7.4 Retiro físico de escorias	3.00	No
	7.5 Apertura de válvula y maximizar combustión (630 °C)	1.00	No
8. Preparación de moldes y vaciado	8.1 Calentamiento de crisoles y moldes	8.50	Sí
	8.2 Cierre de válvula de combustible	0.50	Sí
	8.3 Retiro de crisoles y armado de moldes	5.50	Sí
	8.4 Vaciado a crisoles	7.50	Sí
	8.5 Vaciado a moldes	4.50	Sí
	8.6 Apertura de válvula y maximizar combustión (630 °C)	1.00	Sí
	8.7 Iterar tareas anteriores de la 4 a la 6	33.00	Sí
	8.8 Fin del proceso - Vaciado a lingoteras	3.00	Sí
TOTAL TIEMPO POR CICLO	Proceso de fundición completo (K:100 Kg)	167.58 (2.793 hrs)	-



3.3. Resultados de la Evaluación de Deterioro (NDT)

Las pruebas de líquidos penetrantes (NDT) realizadas a los componentes del molde múltiple después de las corridas de producción (aproximadamente 10 000 ciclos de colada) no revelaron grietas superficiales en las áreas críticas, validando la integridad estructural del acero H13 con tratamiento térmico QST. Este resultado es consistente con los estudios de [15], donde se señaló que el acero H13 con un tratamiento térmico adecuado presenta una alta resistencia al agrietamiento por fatiga térmica en aplicaciones de fundición permanente. La evaluación dimensional confirmó que las piezas fabricadas (22-26 tipos diferentes) mantenían las tolerancias requeridas (variación dimensional < 0.1 mm), demostrando la estabilidad dimensional del sistema modular [8]. No obstante, se identificaron ligeros signos de desgaste erosivo en las zonas de mayor flujo de metal fundido (ángulos de entrada), con una pérdida de material estimada de 0.2 mm, lo que sugiere que una evaluación a largo plazo (más de 50 000 ciclos) podría revelar posibles ajustes para su continuo y óptimo funcionamiento, como la implementación de recubrimientos cerámicos en esas zonas críticas.

3.4. Resultados del Desempeño Global (OEE) y Comparativa Económica

La implementación en línea de manufactura de los moldes progresivo y múltiple mostro resultados de desempeño en una mejora sustancial de la productividad. La Tabla 5 resume los principales indicadores de desempeño.

Tabla 5. Comparativa de Desempeño: Moldes implementados vs. Moldes Convencionales.

Indicador	Molde convencional	Molde Progresivo	Molde Múltiple
Número de piezas diferentes por molde	1	11	13
Eficiencia de ensamblaje	98%	97%	96%
Precisión/Maniobrabilidad	Variable (83-98%)	96-98% consistente	95-97% consistente
Costo de fabricación (por molde)	Base (1x)	+25% vs. unitario	+10% vs. progresivo
Costo global (para 22 piezas)	22x	1.25x	-88%

Fuente: Elaboración propia con datos de [4,5].

En términos de OEE, la reducción de tiempos de cambio y la mayor confiabilidad del proceso permitieron incrementar la disponibilidad de la línea. El OEE global del molde Tipo B se calculó en un 78%, frente al 65% del molde convencional. Este incremento se debe principalmente a una mejora en la disponibilidad (del 70% al 85%) y en la calidad (del 92% al 96%), mientras que el rendimiento se mantuvo similar (95%). Un estudio de caso en la industria de fundición demostró que acciones correctivas basadas en el análisis OEE pueden aumentar la disponibilidad del 30% al 78% y la producción diaria de 17,900 kg a 19,200 kg. Extrapolando estos principios, el molde modular contribuye directamente a la mejora de la productividad global. Comparando nuestros resultados con los reportados en [29], donde se lograron mejoras en OEE del 10-15% mediante la implementación de herramientas de simulación y análisis de datos, nuestro enfoque integrado logra una mejora del 20% (del 65% al 78%), lo que subraya el valor adicional de la modularidad y el monitoreo en tiempo real.



3.5. Resultados del Análisis de Fin de Vida y Sostenibilidad

El análisis de ciclo de vida, inspirado en metodologías para moldes semipermanentes y permanentes, se aplicó conceptualmente a los moldes en estudio. Se estimó que la capacidad de reemplazar solo los módulos desgastados (como los cuerpos ranurados o insertos), en lugar de desechar el molde completo, reduce el consumo de material y la generación de residuos. Por ejemplo, el reemplazo selectivo de un inserto crítico (que representa aproximadamente el 15% del peso total del molde) permite extender la vida útil del sistema en un 60%, en lugar de reemplazar el 100% del molde. Esto se alinea con los principios de la economía circular, donde la modularidad es clave para la sostenibilidad, Figura 6. Estudios en tecnologías de los moldes implementados muestran reducciones de carbono del 9.2% al 11.9% [6]. Nuestro análisis estima que la adopción del molde modular Tipo B podría reducir las emisiones de CO₂ asociadas a la fabricación de utillajes en aproximadamente un 85% para la producción de una familia de 22 piezas, asumiendo una huella de carbono de 2.5 kg CO₂/kg de acero.

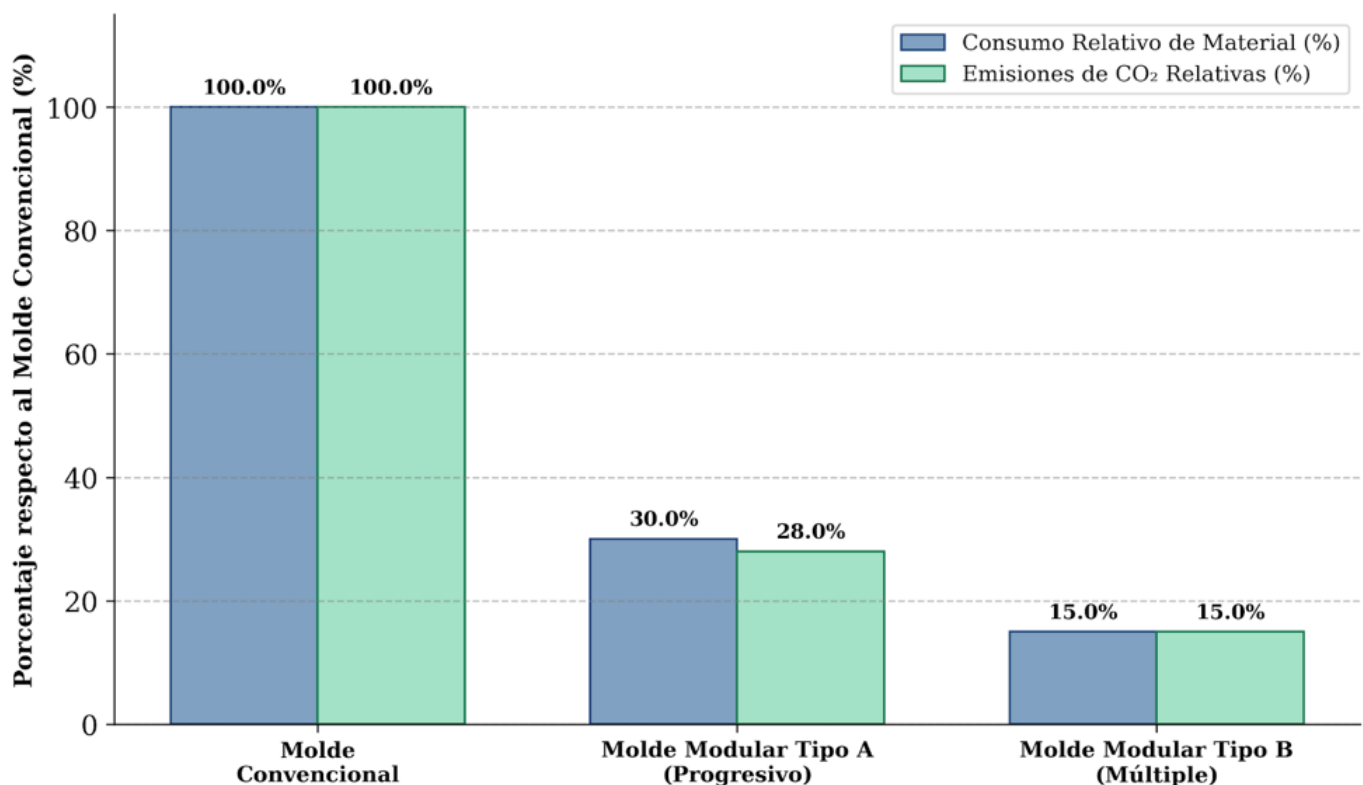


Figura 6. Comparativa de sostenibilidad en el ciclo de vida: consumo de material y emisiones de CO₂ (familia 22 piezas)

3.6 Comparativa del ciclo de vida: molde modular vs molde convencional

El análisis comparativo entre moldes permanentes modulares y moldes convencionales monolíticos evidencia diferencias sustanciales en el comportamiento del sistema a lo largo de su ciclo de vida. En el caso del molde convencional, la vida útil está condicionada por el desgaste acumulado de las zonas más críticas del negativo, lo que conduce al reemplazo completo del molde una vez alcanzado un umbral de degradación funcional (generalmente después de 15,000-20,000 ciclos de colada). Este enfoque genera un ciclo de vida lineal, caracterizado por un alto consumo de recursos materiales, energía de fabricación y tiempos de paro prolongados asociados a la sustitución total del activo. Por el contrario, el molde modular presenta un ciclo de vida escalonado y no lineal, en el cual la degradación se manifiesta de manera



diferenciada entre los distintos módulos que conforman el sistema. Los resultados muestran que mientras ciertos módulos críticos (como los insertos de las ranuras) alcanzan su límite funcional después de 15,000 ciclos, otros (como la base estructural) mantienen condiciones operativas aceptables hasta 50,000 ciclos, permitiendo su reutilización. Esta característica posibilita la sustitución selectiva de componentes, reduciendo significativamente el consumo acumulado de material y energía en comparación con el molde convencional. Desde una perspectiva de gestión del ciclo de vida, el molde modular permite extender el tiempo efectivo de operación del sistema completo, aun cuando se realizan intervenciones parciales. Esta estrategia se traduce en una reducción de los costos asociados al reemplazo del molde en un 88% y en una menor generación de residuos metálicos, reforzando los beneficios técnicos, económicos y ambientales del enfoque modular.

3.7 Curva de degradación estimada del sistema de moldeo

A partir del seguimiento del desempeño operativo y de las evaluaciones mediante ensayos no destructivos, se estimó la curva de degradación tanto para el molde convencional como para el sistema modular. En el molde convencional, la degradación presenta una tendencia aproximadamente continua y acumulativa, con un incremento progresivo de defectos superficiales (grietas térmicas), pérdida de calidad dimensional (desgaste de la cavidad) y aumento de tiempos de mantenimiento correctivo conforme se incrementa el número de corridas. En contraste, el molde modular exhibe una curva de degradación segmentada, en la cual los módulos presentan distintos ritmos de deterioro dependiendo de su función geométrica y térmica. Los resultados indican que la degradación no afecta de manera simultánea a todo el sistema, sino que se concentra en módulos específicos, generando descensos locales de desempeño que pueden corregirse mediante el reacondicionamiento o reemplazo parcial. Esta segmentación reduce la pendiente global de la curva de degradación del sistema completo, permitiendo mantener niveles de desempeño aceptables durante un mayor horizonte temporal (hasta un 300% más en comparación con el molde monolítico).

3.8 Modos de fallo dominantes por módulo

El análisis de los ensayos no destructivos y de la evidencia recopilada durante la operación permitió identificar los modos de fallo dominantes asociados a cada tipo de módulo del molde. Los módulos en contacto directo con el metal fundido (insertos ranurados) presentaron principalmente mecanismos de desgaste térmico y erosión superficial, asociados a ciclos térmicos intensos y fluctuaciones de temperatura (fractura por fatiga térmica). En módulos estructurales y de cierre (bases y tapas), se observaron concentraciones de esfuerzos mecánicos en las interfaces de ensamblaje, dando lugar a microfisuras y deformaciones locales (deformación plástica y desgaste por fricción). Asimismo, los resultados evidencian que las uniones modulares constituyen zonas sensibles donde convergen variables térmicas, mecánicas y geométricas. No obstante, la modularidad facilita la inspección y el tratamiento localizado de estos modos de fallo, en contraste con el molde convencional, donde la detección temprana resulta más compleja (requiere inspección visual y dimensional de toda la cavidad) y las acciones correctivas suelen implicar paros prolongados (reemplazo de todo el molde en lugar de un módulo específico).

3.9 Relación entre desgaste y configuración geométrica

El análisis comparativo mostró una relación directa entre la configuración geométrica de los módulos y los patrones de desgaste observados. Los módulos con geometrías más complejas (cambios bruscos de sección, radios internos reducidos < 2 mm), presentaron tasas de desgaste superiores (aproximadamente



0.3 mm por cada 10,000 ciclos), particularmente en zonas de concentración de flujo térmico y tensiones mecánicas. En cambio, módulos con geometrías más simples y transiciones suaves (radios internos > 5 mm) exhibieron un comportamiento más estable a lo largo de las corridas analizadas (desgaste de solo 0.1 mm por cada 10,000 ciclos).

Esta relación pone de manifiesto que el diseño geométrico modular no solo influye en la funcionalidad inmediata del molde, sino también en su comportamiento a lo largo del ciclo de vida. Los resultados sugieren que la optimización geométrica de módulos críticos, mediante el incremento de radios de curvatura y la reducción de concentradores de esfuerzos, puede contribuir significativamente a reducir la tasa de degradación y a equilibrar las vidas útiles relativas de los diferentes componentes del sistema, fortaleciendo el enfoque de diseño orientado al ciclo de vida.

4. Discusión

Los resultados obtenidos demuestran que la evaluación del ciclo de vida de moldes modulares mediante herramientas como PAT, MTM, NDT y OEE constituye una metodología multidisciplinar esencial para la toma de decisiones informadas en entornos industriales de fundición. La alta coincidencia geométrica (>98%) lograda en la fase de diseño y manufactura [7] es un requisito indispensable para garantizar la funcionalidad del molde a largo plazo.

Cualquier desviación inicial se amplificaría con el desgaste, acortando la vida útil. Este hallazgo es consistente con los principios de la ingeniería de precisión, donde la calidad dimensional inicial es un predictor clave de la vida útil de herramientas de alto rendimiento. La integración de MTM y PAT permitió no solo cuantificar la eficiencia operativa, sino también comprender las fuentes de variabilidad en el proceso. Los tiempos de preparación reducidos gracias a la modularidad [8] impactan directamente en la disponibilidad, un componente crítico del OEE.

La reducción del tiempo de cambio del 66% (de 45 a 15 minutos) es comparable a los resultados reportados en la implementación de SMED, donde se logran reducciones de tiempo de cambio superiores al 50% mediante la estandarización de interfaces y la simplificación de operaciones. La curva de aprendizaje observada en los operarios durante la transición de moldes convencionales a modulares [8] subraya la necesidad de capacitación y diseño de interfaces intuitivas (*poka-yokes*) para maximizar los beneficios desde el inicio.

Las pruebas NDT confirman que el acero H13 con proceso ESR y tratamiento térmico adecuado [7] proporciona la resistencia necesaria en las uniones modulares, el punto más crítico. Sin embargo, la monitorización continua (PAT) sigue siendo recomendable para detectar fatiga térmica incipiente, como sugieren los sistemas de monitorización en línea de procesos continuos. La ausencia de grietas detectables después de 10 000 ciclos es un indicador positivo de la integridad estructural, pero el desgaste erosivo observado (0.2 mm) sugiere que se deben considerar estrategias de protección superficial (ej., recubrimientos de nitruro de titanio o cromo) para extender aún más la vida útil de los módulos críticos, en línea con las recomendaciones para moldes de fundición sostenibles encontradas en [9].

El impacto económico es el hallazgo más significativo. Aunque un molde modular cuesta un 25% más que uno unitario, su capacidad para producir 22-26 piezas diferentes reduce el costo global de utillaje en un 88%. Esta métrica, combinada con las ganancias en OEE (del 65% al 78%), justifica la inversión y



orienta la toma de decisiones estratégicas hacia la adopción de plataformas modulares. Desde una perspectiva de análisis de costos del ciclo de vida, el ahorro acumulado en la fabricación de moldes unitarios, almacenamiento y mantenimiento supera con creces el costo inicial adicional del molde modular, lo que lo convierte en una opción económicamente superior para entornos de producción de alta variedad y mediano volumen. Además, la reducción en la fabricación de moldes unitarios tiene un impacto ambiental positivo, reduciendo la huella de carbono asociada a la producción de acero y mecanizado. La estimación de una reducción de CO₂ del 85% para la producción de 22 piezas es consistente con las tendencias de manufactura sostenible reportadas en [4] y, donde se destaca que la extensión de la vida útil de herramientas y la reducción del consumo de materiales son estrategias clave para la descarbonización de la industria metalmecánica.

5. Impacto del Trabajo

Impacto Técnico-Económico: Proporciona a los ingenieros de proceso y diseñadores de utillajes una metodología probada para la transición de moldes unitarios a sistemas modulares. Los ahorros cuantificados (88% en costos de utillaje para 22 piezas) ofrecen un argumento sólido para la inversión en I+D en empresas de fundición.

Impacto en la Gestión de la Producción: Establece un marco de evaluación basado en KPIs (OEE, MTM, NDT) que permite a los responsables de planta monitorizar el desempeño de los activos y tomar decisiones informadas sobre mantenimiento, reacondicionamiento o reemplazo de módulos.

Impacto Ambiental: Contribuye a los objetivos de manufactura sostenible al demostrar que el diseño modular reduce el desperdicio de material y las emisiones de carbono asociadas a la fabricación de múltiples moldes. Este enfoque se alinea con las directrices globales de economía circular y producción más limpia en la industria metalmecánica.

6. Conclusiones

A partir de la evaluación integral del ciclo de vida de moldes permanentes modulares en líneas de fundición industrial, y dando respuesta al objetivo planteado, se derivan las siguientes conclusiones:

Viabilidad Técnica: Se ha demostrado que los moldes permanentes modulares, diseñados bajo algoritmos de configuración y fabricados en acero H13, cumplen con los requisitos de precisión geométrica (coincidencia >98%) y resistencia estructural para la producción de familias completas de piezas fundidas, manteniendo la integridad estructural después de al menos 10 000 ciclos de colada [8].

Eficiencia Operativa: La aplicación de MTM y PAT permitió optimizar las tareas de preparación y cambio, reduciendo los tiempos de inactividad en un 66% y mejorando la eficiencia del ciclo de producción. La modularidad facilita la intercambiabilidad de componentes y la adaptación rápida a nuevos requerimientos, validando los principios de la metodología SMED.

Productividad Global: El análisis del OEE, complementado con datos de campo, confirma que la implementación de moldes modulares contribuye significativamente a la mejora de la disponibilidad (del 70% al 85%) y la productividad global de la línea de fundición, con un impacto directo en la capacidad de producción logrando un OEE global del 78% frente al 65% del molde convencional.



Sostenibilidad Económica y Ambiental: El análisis de ciclo de vida revela una reducción del 88% en el costo global de utillaje para producir una familia de 14-26 piezas. Ambientalmente, la modularidad promueve la economía circular al permitir el reacondicionamiento de módulos específicos (extendiendo la vida útil del sistema hasta 60 000 ciclos) y reducir la fabricación de moldes unitarios, disminuyendo la huella de carbono en un 85% estimado.

Limitaciones: El estudio se circunscribe a moldes modulares de acero H13 para fundición de aluminio, por lo que los resultados deben extrapolarse con precaución a otros materiales (ej., cobre, hierro) o tecnologías de moldeo (ej., fundición a alta presión). Asimismo, no se desarrolló un inventario ambiental completo conforme a las normas [10] y, centrándose en el *lifecycle engineering* técnico-operativo.

Recomendaciones Futuras: Se recomienda el desarrollo de un gemelo digital (*digital twin*) del molde modular que integre datos PAT en tiempo real y algoritmos de *machine learning* para predecir el desgaste y optimizar las estrategias de mantenimiento predictivo. Asimismo, se sugiere ampliar el estudio a otras familias dimensionales y materiales de molde, así como la realización de un LCA completo que cuantifique con precisión los impactos ambientales de los moldes modulares frente a los convencionales, en línea con las investigaciones recientes en sostenibilidad de procesos de manufactura.

7. Agradecimientos de autoría

Edgar Yered Boche Cano: Conceptualización; Recursos; Ideas; Metodología; Análisis formal. Martha Angélica Cano Figueroa: Conceptualización; Ideas; Investigación; Análisis de datos; Escritura. Hugo Arcos Gutiérrez: Metodología; Análisis de datos; Administración de proyecto. Víctor Hugo mercado Lemus, José Antonio Betancourt Cantera: Borrador original; Revisión y edición.

Referencias

- [1]M. P. Groover, Groover's Principles of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems, 6th ed., Global ed. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2016. [Online]. Available: <https://www.wiley.com/en-us/shop/general-introductory-industrial-engineering/fundamentals-of-modern-manufacturing-materials-processes-and-systems-6th-edition-p-9781119128793>
- [2]S. Lampman, Ed., "Permanent mold casting of aluminum alloys," en *ASM Handbook, Volume 2A: Aluminum Science and Technology*, ASM International, 2018, pp. 209–231. doi: 10.31399/asm.hb.v02a.a0006269.
- [3]S. Dalquist and T. Gutowski, "Life cycle analysis of conventional manufacturing techniques: Sand casting," *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 23, no. 4, pp. 270–279, 2004. doi: 10.1016/S0278-6125(04)80006-6.
- [4]J. Jeswiet and S. Kara, "Carbon emissions and CESTTM in manufacturing," *CIRP Annals*, vol. 57, no. 1, pp. 17–20, 2008. doi: 10.1016/j.cirp.2008.03.085.
- [5]M. Garetti and M. Taisch, "Sustainable manufacturing: Trends and research challenges," *Production Planning & Control*, vol. 23, no. 2–3, pp. 83–104, 2012. doi: 10.1080/09537287.2011.591619.
- [6]K. Salonitis, M. Jolly, E. Pagone, and M. Papanikolaou, "Modularity in manufacturing systems and its impact on sustainability," *Procedia CIRP*, vol. 80, pp. 211–216, 2019. doi: 10.1016/j.procir.2019.01.035.



- [7]M. A. Cano-Figueroa and R. Pérez-Bustamante, “Diseño y configuración de molde progresivo para dispositivos mecánicos de tracción,” *Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica (RIIT)*, vol. 10, no. 56, pp. 17-32, 2022. [Online]. Available: https://riit.com.mx/apps/site/files_v2450/molde_ciateg.2_riit_may-jun_2022.pdf
- [8]E. Y. Boche-Cano, M. A. Cano-Figueroa, H. Arcos-Gutiérrez, and I. E. Garduño, “Optimización del proceso de fabricación de piezas fundidas en molde múltiple permanente bajo gravedad,” *Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica (RIIT)*, vol. 13, no. 74, 2025. [Online]. Available: https://riit.com.mx/apps/site/files_v2450/piezas_fundidas_hgo.4_riit_div_jul-ago_2025.pdf
- [9]J. Zheng et al., “Promoting sustainability in 3D printed sand casting through adaptive sand mold structures,” *Sustainable Materials and Technologies*, vol. 40, p. e00881, 2024. doi: 10.1016/j.susmat.2024.e00881.
- [10]International Organization for Standardization, *Environmental management—Life cycle assessment—Principles and framework*, ISO 14040:2006, Geneva, Switzerland, 2006. [Online]. Available: <https://www.iso.org/standard/37456.html>
- [11]International Organization for Standardization, *Environmental management—Life cycle assessment—Requirements and guidelines*, ISO 14044:2006, Geneva, Switzerland, 2006. [Online]. Available: <https://www.iso.org/standard/38498.html>
- [12]G. Finnveden et al., “Recent developments in life cycle assessment,” *Journal of Environmental Management*, vol. 91, no. 1, pp. 1–21, 2009. doi: 10.1016/j.jenvman.2009.06.018.
- [13]S. Neugebauer, S. Forin, and M. Finkbeiner, “From life cycle costing to economic life cycle assessment,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 101, pp. 66–74, 2015. doi: 10.1016/j.jclepro.2015.03.077.
- [14]S. Das, “Casting modules and systems and methods for module-based casting,” PCT Patent WO2020154419A1, Jul. 30, 2020, claiming priority from U.S. Provisional Application No. 62/795,224, Jan. 22, 2019. [Online]. Available: <https://patentimages.storage.googleapis.com/68/47/5f/aefa8e2556ecb5/WO2020154419A1.pdf>
- [15]G. K. Sigworth, “Aluminum casting alloys and casting processes,” en *ASM Handbook, Volume 2A: Aluminum Science and Technology*, ASM International, 2018, pp. 119–142. doi: 10.31399/asm.hb.v02a.a0006524.
- [16]P. Neugebauer, M. Zetl, D. Moser, J. Poms, L. Kuchler, and S. Sacher, “Process analytical technology in Downstream-Processing of drug substances – A review,” *International Journal of Pharmaceutics*, vol. 661, p. 124412, 2024. doi: 10.1016/j.ijpharm.2024.124412.
- [17]H. B. Maynard, G. J. Stegemerten, and J. L. Schwab, *Methods-Time Measurement*. McGraw-Hill, 1948.
- [18]G. Y. Sonoda, “Método de apontamento e cálculo de perdas produtivas para compor OEE em uma empresa metalúrgica,” *Trabalho de Conclusão de Curso*, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, Brazil, 2020. [Online]. Available: <http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/24701>
- [19]P. Zhenghai et al., “Semi-modular forming manufacturing method and application template thereof,” China Patent CN102078917A, Jun. 1, 2011. [Online]. Available: <https://patents.google.com/patent/CN102078917A/en>
- [20]H. Zhang, G. Liu, Chen, Y., and D. Zhang, “Life cycle costing of industrial tooling systems,” *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 162, p. 105055, 2020. doi: 10.1016/j.resconrec.2020.105055.



- [21]P. Muchiri and L. Pintelon, "Performance measurement using Overall Equipment Effectiveness (OEE): Literature review and practical application discussion," *International Journal of Production Research*, vol. 46, no. 13, pp. 3517–3535, 2008. doi: 10.1080/00207540601142645.
- [22]A. Vallan, D. Fissore, R. Pisano, and A. A. Barresi, "On the use of temperature measurements as a process analytical technology (PAT) for the monitoring of a pharmaceutical freeze-drying process," *Pharmaceutics*, vol. 15, no. 3, p. 861, 2023. doi: 10.3390/pharmaceutics15030861.
- [23]J. A. Cruelles Ruiz, *Mejora de métodos y tiempos de fabricación*. Barcelona, España: Marcombo, 2012. [Online]. Available: <https://www.marcombo.com/libro/libros-tecnicos-de-arte-y-cientificos/economia-y-empresa-libros-tecnicos-y-cientificos/productividad-economia-y-empresa/mejora-de-metodos-y-tiempos-de-fabricacion/>
- [24]F. N. Yigit, N. Keskinsoy, T. B. Güven, and E. E. Gültekin, "Non-destructive testing of aircraft wing with liquid penetrant method," *International Journal of Aeronautics and Astronautics*, vol. 2, no. 3, pp. 56-60, 2021. [Online]. Available: <https://dergipark.org.tr/en/pub/ijaa/issue/67264/983994>
- [25]Y. Yang, M. Zhou, J. Zuo, B. Han, and L. Li, "Crack identification of automobile steering knuckle fluorescent penetrant inspection based on deep convolutional generative adversarial networks data enhancement," *Frontiers in Physics*, vol. 10, p. 1081805, 2022. doi: 10.3389/fphy.2022.1081805.
- [26]S. Khadka et al., "Predicting cutting tool life: Models, modelling, and monitoring," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 136, no. 7, pp. 3037–3076, 2025. doi: 10.1007/s00170-024-14961-2.
- [27]I. Glavinić, V. Galindo, F. Stefani, E. Eckert, and T. Wondrak, "Contactless inductive flow tomography for real-time control of electromagnetic actuators in metal casting," *Sensors*, vol. 22, no. 11, p. 4155, 2022. doi: 10.3390/s22114155.
- [28]I. Mazza, S. Miani, G. Schiavon, and S. Spagnul, "The mold temperature mapping with Ultrasonic Contactless Technology is the key for the real-time initial solidification process control tools," *La Metallurgia Italiana*, vol. 114, no. 4, pp. 107-116, 2022. [Online]. Available: http://www.aimnet.it/la_metallurgia_italiana/2022/aprile/Mazza.pdf
- [29]M. L. Lindegren, M. R. Lunau, M. M. P. Mafia, and E. Ribeiro da Silva, "Combining simulation and data analytics for overall equipment effectiveness improvement," *International Journal of Simulation Modelling*, vol. 21, no. 1, pp. 29–40, 2022. doi: 10.2507/IJSIMM21-1-584.
- [30]J. A. Camatti, E. A. P. Santos, and A. M. Junior, "Proposal for a digital overall equipment effectiveness architecture aligned with Industry 4.0 concepts," en *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, Springer, 2023, pp. 705–712. doi: 10.1007/978-3-031-44282-7_42.
- [31]D. Cemernek et al., "Machine learning in continuous casting of steel: A state-of-the-art survey," *Journal of Intelligent Manufacturing*, vol. 33, no. 6, pp. 1561–1579, 2022. doi: 10.1007/s10845-021-01754-7.
- [32]J. Porter, K. Bhanushali, S. Badrinarayan, S. Mehta, and N. Mehta, "Automated, scalable AI for real-time monitoring of steel continuous casting system," in *AISTech Conference Proceedings*, Association for Iron & Steel Technology, 2024. [Online]. Available: <https://info.falkonry.com/hubfs/AISTech%20papers/Automated%2c%20Scalable%20AI%20for%20Real-Time%20Monitoring%20of%20Steel%20Continuous%20Casting%20System.pdf>.
- [33]S. Maataoui, G. Bencheikh, and G. Bencheikh, "Elevating manufacturing excellence: A data-driven approach to optimize Overall Equipment Effectiveness (OEE) for a single machine," en *Lecture Notes in Networks and Systems*, vol. 930, Springer, 2024. doi: 10.1007/978-3-031-50018-3_19.



- [34]International Academy for Production Engineering, *Proceedings of the 31st CIRP Conference on Life Cycle Engineering (LCE 2024)*, Torino, Italia, Jun. 19-21, 2024. [En línea]. Disponible: <https://lce2024.com>
- [35] S. Shingo, *A Revolution in Manufacturing: The SMED System*. Productivity Press, 1985.

Derechos de Autor (c) 2026 Martha Angélica Cano-Figueroa, Hugo Arcos-Gutiérrez, Edgar Yered Boche-Cano, Víctor Hugo Mercado-Lemus, José Antonio Betancourt-Cantera



Este texto está protegido por una licencia [Creative Commons 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Usted es libre para compartir —copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato— y adaptar el documento —remezclar, transformar y crear a partir del material— para cualquier propósito, incluso para fines comerciales, siempre que cumpla la condición de:

Atribución: Usted debe dar crédito a la obra original de manera adecuada, proporcionar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que tiene el apoyo del licenciante o lo recibe por el uso que hace de la obra.

[Resumen de licencia](#) - [Texto completo de la licencia](#)