

Journal of Engineering Research

ISSN 2764-1317

vol. 6, n. 1, 2026

... ARTICLE 6

Acceptance date: 04/02/2026

INYECTORA DE PLÁSTICO AUTOMATIZADA PARA LA MANUFACTURA SOSTENIBLE

López Maldonado Omar

Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Pinotepa

Martínez Vásquez Jaime

Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Pochutla

López Rivera Marcos Samuel

Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Pinotepa

Rodríguez Santiago Cesar Ulises

Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Pinotepa

Pérez Baños Paola Isabel

Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Pinotepa



All content published in this journal is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0).

Resumen: La industria del moldeo por inyección de plásticos, un pilar de la manufactura moderna, enfrenta desafíos relacionados con el alto consumo energético, la optimización de procesos y la creciente demanda de sostenibilidad. Las tecnologías convencionales, predominantemente basadas en sistemas hidráulicos, presentan limitaciones en términos de eficiencia, precisión e impacto ambiental. Este artículo presenta el diseño, desarrollo y validación de una inyectora de plástico automatizada que integra un pistón de accionamiento eléctrico y un sistema de control de temperatura Proporcional-Integral-Derivativo (PID) como una solución avanzada para la manufactura sostenible. A diferencia de los sistemas tradicionales, el actuador eléctrico ofrece una reducción drástica del consumo energético, estimada entre un 30% y un 70%, y una precisión superior en el control del ciclo de inyección, lo que minimiza el desperdicio de material y mejora la calidad de las piezas. El control PID, por su parte, garantiza una estabilidad térmica excepcional en la boquilla y el molde, un factor crucial para la calidad del producto final y la repetibilidad del proceso. Se presenta una revisión exhaustiva de la literatura sobre la evolución de las máquinas de inyección, la eficiencia energética de los sistemas eléctricos frente a los hidráulicos, y el papel de los sistemas de control avanzados en la optimización del proceso. La metodología abarca el diseño mecánico asistido por computadora (CAD), la selección de componentes, la implementación del sistema de control y la construcción de un prototipo funcional. Finalmente, se discuten las implicaciones de esta tecnología en el contexto de la Industria 4.0, destacando su potencial para la integración de sensores, el monitoreo en tiempo real y la creación de sistemas de

producción ciberfísicos que impulsan una manufactura más inteligente, competitiva y ecológicamente responsable. Este trabajo no solo propone una mejora tecnológica incremental, sino que también establece un marco para la transición hacia prácticas de producción más sostenibles en la industria del plástico.

Palabras clave: moldeo por inyección, automatización, manufactura sostenible, eficiencia energética, control PID, pistón eléctrico, Industria 4.0.

Introducción

La industria del plástico, desde su auge a mediados del siglo XX, se ha consolidado como un pilar indispensable de la economía global y un catalizador para la innovación en prácticamente todos los sectores productivos. Su versatilidad, bajo costo, durabilidad y ligereza han permitido el desarrollo de productos que han redefinido la vida moderna, abarcando desde empaques para alimentos que prolongan su vida útil, hasta componentes automotrices que reducen el peso de los vehículos y mejoran la eficiencia del combustible, pasando por dispositivos médicos estériles y desechables que han revolucionado la atención sanitaria (Groover, 1997). Dentro del arsenal de tecnologías de procesamiento de polímeros, el moldeo por inyección se erige como el método preeminente para la producción en masa de piezas con geometrías complejas, tolerancias dimensionales estrictas y acabados superficiales de alta calidad. La capacidad de este proceso para transformar un granulado de polímero en una pieza funcional en cuestión de segundos ha sido un motor fundamental para la producción a escala industrial (Contreras Bravo et al., 2018).

El mercado global de moldeo por inyección, valorado en más de 300 mil millones de dólares en 2024, atestigua su importancia económica y su omnipresencia en la cadena de suministro global (Arslan et al., 2025).

No obstante, el éxito y la ubicuidad de la industria del plástico no han estado exentos de importantes desafíos. En la era actual, la manufactura se encuentra en una encrucijada, presionada por dos fuerzas transformadoras de escala planetaria: la imperiosa necesidad de una transición hacia la sostenibilidad ambiental y la irrupción de la cuarta revolución industrial, o Industria 4.0. Por un lado, la creciente evidencia del cambio climático, la contaminación por plásticos y el agotamiento de los recursos fósiles ha generado una demanda social y regulatoria sin precedentes para que las industrias minimicen su huella ecológica. El sector del plástico, en particular, se encuentra bajo un intenso escrutinio. El moldeo por inyección es un proceso inherentemente intensivo en energía. Las máquinas tradicionales, que en su gran mayoría dependen de sistemas hidráulicos para generar las colosales fuerzas necesarias para cerrar los moldes e inyectar el polímero fundido, son conocidas por su baja eficiencia energética. Se estima que el consumo eléctrico puede representar más del 90% de los costos energéticos en una planta de moldeo, y una parte significativa de esta energía se desperdicia en forma de calor debido al funcionamiento continuo de las bombas hidráulicas y las ineficiencias del sistema (Zhang et al., 2017). Este alto consumo no solo tiene un impacto ambiental directo a través de las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas a la generación de electricidad, sino que también representa un costo operativo sustancial que erosiona la competitividad de las empresas.

Por otro lado, la Industria 4.0 promete reconfigurar radicalmente el panorama de la producción. La convergencia de la automatización avanzada, la sensórica, el Internet de las Cosas (IoT), el análisis de Big Data y la inteligencia artificial (IA) está dando lugar a la creación de “fábricas inteligentes” o sistemas de producción ciberfísicos. En estas fábricas, las máquinas no solo ejecutan tareas, sino que también monitorean su propio estado, se comunican entre sí, analizan datos en tiempo real para optimizar su rendimiento y se adaptan dinámicamente a las variaciones del proceso (Ageyeva et al., 2019). Para el moldeo por inyección, esta revolución digital ofrece un camino para trascender el control de procesos tradicional, a menudo reactivo y basado en la experiencia del operario, hacia un paradigma de control predictivo, autónomo y basado en datos. El objetivo ya no es solo producir piezas, sino producirlas con la máxima calidad, el mínimo desperdicio y la mayor eficiencia energética posible, en cada ciclo (Arslan et al., 2025).

Es en la intersección de estos dos grandes desafíos —la sostenibilidad y la digitalización— donde se sitúa el presente proyecto. Este trabajo aborda la necesidad crítica de modernizar el proceso de moldeo por inyección a través del diseño, la construcción y la validación de una inyectora de plástico totalmente automatizada, concebida desde sus cimientos bajo los principios de la manufactura sostenible. La innovación central de nuestra propuesta es doble: la sustitución del sistema de accionamiento hidráulico, intensivo en energía, por un pistón eléctrico de alta eficiencia y precisión; y la implementación de un sistema de control de temperatura Proporcional-Integral-Derivativo.

vativo (PID) de lazo cerrado, garantizando una estabilidad térmica excepcional.

La adopción de un pistón eléctrico ataca directamente el talón de Aquiles de las máquinas tradicionales: el consumo energético. A diferencia de una bomba hidráulica que opera continuamente, un actuador eléctrico consume una cantidad de energía solo cuando está en movimiento, lo que resulta en ahorros energéticos que la literatura sitúa entre el 30% y el 70% (Castro Martínez, 2006). Además, la naturaleza digital del control de un servomotor permite una precisión y repetibilidad en la posición, velocidad y fuerza que son prácticamente inalcanzables para los sistemas hidráulicos. Esta precisión se traduce en un control más fino sobre variables críticas del proceso como el volumen de inyección y la presión de mantenimiento, lo que conduce a una mayor consistencia en la calidad de las piezas y una reducción drástica de la tasa de rechazo, minimizando así el desperdicio de material (Zhao et al., 2020).

De forma complementaria, el control de temperatura PID se erige como el guardián de la estabilidad del proceso. La temperatura del polímero es, sin duda, una de las variables más influyentes, afectando su viscosidad, su comportamiento de flujo dentro del molde y las propiedades finales de la pieza, como su estabilidad dimensional y su resistencia mecánica. Un control de temperatura inadecuado es una fuente común de una plétora de defectos de moldeo. El sistema PID implementado en este proyecto utiliza un bucle de retroalimentación constante para monitorear la temperatura y ajustar la potencia de calentamiento en tiempo real, asegurando que el proceso se mantenga dentro de una ventana operativa óptima y extremadamente estrecha, ciclo tras ciclo (Kanagalakshmi & Manamalli, 2016).

Este artículo se propone documentar de manera exhaustiva el viaje de investigación y desarrollo de esta innovadora máquina. Se comenzará con una revisión profunda de los antecedentes y el estado del arte, trazando la evolución tecnológica desde las máquinas hidráulicas hasta las eléctricas y explorando las tendencias actuales en control de procesos y manufactura inteligente. A continuación, se detallará la metodología de diseño y construcción, abarcando desde la fase conceptual y el modelado en CAD, hasta la selección rigurosa de componentes y el ensamblaje final del prototipo. Se dedicará una atención especial al diseño del sistema de control, explicando la arquitectura de hardware y software que da vida a la máquina. Posteriormente, se presentarán y discutirán los resultados experimentales, cuantificando el rendimiento del prototipo en términos de eficiencia energética, precisión de control y calidad del producto. Finalmente, se extraerán las conclusiones clave del estudio y se delinearán las futuras líneas de investigación, explorando el vasto potencial de esta tecnología para escalar e integrarse en los ecosistemas de producción de la Industria 4.0, impulsando así una industria del plástico más sostenible, inteligente y competitiva.

Estado del Arte

El moldeo por inyección de plásticos, una tecnología con más de un siglo de historia, ha sido objeto de una evolución constante, impulsada por la incesante búsqueda de mayor eficiencia, precisión y versatilidad. Para comprender la importancia y la innovación del presente proyecto, es fundamental analizar el estado del arte a través de tres ejes evolutivos que han definido la trayectoria de esta tecnología: la transición de los sistemas de accionamiento, la sofisticación de los

sistemas de control de proceso y la reciente integración de paradigmas de manufactura inteligente como la Industria 4.0.

La Evolución de la Fuerza Motriz

La historia temprana del moldeo por inyección está intrínsecamente ligada a la potencia hidráulica. Desde las primeras máquinas comerciales hasta bien entrada la década de 1980, los sistemas hidráulicos fueron la tecnología de accionamiento dominante y casi exclusiva (Cornish Alvarez, 1997). El principio es conceptualmente simple: un motor eléctrico acciona una bomba que presuriza un fluido, generalmente un aceite mineral, que luego se dirige a través de una serie de válvulas para accionar cilindros que realizan las funciones principales de la máquina, como el cierre del molde y la inyección del polímero. La gran ventaja de la hidráulica, que explica su longevidad, es su excepcional densidad de potencia. Los sistemas hidráulicos pueden generar fuerzas inmensas (cientos o incluso miles de toneladas de fuerza de cierre) con actuadores relativamente compactos, una característica indispensable para el moldeo de piezas grandes como parachoques de automóviles o contenedores industriales (Kalpakjian & Schmid, 2002).

Sin embargo, esta fuerza bruta tiene un costo significativo en términos de eficiencia energética. El principal inconveniente de los sistemas hidráulicos tradicionales, especialmente aquellos basados en bombas de desplazamiento fijo, es su considerable consumo de energía en vacío. La bomba a menudo funciona de manera continua para mantener el sistema presurizado, incluso durante las fases del ciclo donde no se requiere movimiento, como el enfriamiento y el mantenimiento de la presión. Durante estos

periodos, el exceso de flujo de aceite se desvía de nuevo al tanque a través de válvulas de alivio, disipando energía en forma de calor. Este calor no solo representa un desperdicio directo de energía, sino que a menudo requiere la instalación de intercambiadores de calor o enfriadores (chillers) para mantener la temperatura del aceite hidráulico dentro de un rango operativo seguro, lo que añade una carga energética adicional al sistema. El estudio de Zhang et al. (2017) analiza en detalle la distribución del consumo energético en una máquina hidráulica, identificando las fases de plastificación y enfriamiento como las de mayor ineficiencia, donde el sistema proporciona una gran cantidad de potencia mientras que la carga requerida es relativamente baja.

La creciente preocupación por los costos energéticos, exacerbada por las crisis del petróleo de los años 70, y una mayor conciencia ambiental, catalizaron la búsqueda de alternativas. La respuesta tecnológica llegó con la maduración de la tecnología de servomotores y accionamientos de CA (corriente alterna) de alta potencia, lo que permitió el desarrollo de las máquinas de inyección totalmente eléctricas (all-electric). Introducidas comercialmente en Japón en la década de 1980, estas máquinas reemplazan por completo el sistema hidráulico. Cada eje de movimiento principal —cierre del molde, inyección, dosificación (rotación del husillo) y expulsión de la pieza— es accionado por un servomotor eléctrico independiente, controlado digitalmente (Marcilla Gomis, 2012).

Las ventajas de este enfoque son múltiples y transformadoras. La más citada es la drástica reducción del consumo energético. Al eliminar el consumo en vacío, la energía se consume “a demanda”, es decir,

solo cuando se realiza un trabajo mecánico. Diversos estudios y mediciones industriales han cuantificado este ahorro, con cifras que consistentemente se ubican en un rango del 30% al 70% en comparación con máquinas hidráulicas de tamaño similar, dependiendo de factores como el tiempo de ciclo, el grosor de la pared de la pieza y el material procesado (Castro Martínez, 2006; Enefsolutions, 2025). Más allá de la energía, las máquinas eléctricas ofrecen un salto cualitativo en precisión y repetibilidad. Los servomotores, controlados por encoders de alta resolución, permiten un control digital exacto sobre la posición, la velocidad y el par. Esto se traduce en una dosificación del material extremadamente precisa, perfiles de inyección y mantenimiento de presión más consistentes, y movimientos de apertura y cierre del molde más rápidos y suaves. El resultado es una mejora notable en la calidad del producto, con menor variabilidad en el peso de la pieza, mayor estabilidad dimensional y una reducción significativa de defectos como las rebabas o el llenado incompleto (Zhao et al., 2020). Además, la ausencia de aceite hidráulico elimina los riesgos de fugas y contaminación (crucial en aplicaciones de sala limpia como el moldeo de dispositivos médicos), reduce los costos de mantenimiento asociados al fluido y los filtros, y proporciona un entorno de trabajo más silencioso y limpio.

No obstante, la transición no ha sido absoluta. Las máquinas eléctricas suelen tener un costo de adquisición inicial más elevado. Además, aunque la tecnología de servomotores ha avanzado enormemente, la generación de las fuerzas de cierre más extremas (por encima de las 1000-1500 toneladas) sigue siendo un desafío técnico y económico, por lo que los sistemas hidráulicos aún conservan un nicho en el mercado de piezas de muy gran tamaño (Zhang et al., 2017).

Para conciliar estas diferencias, ha surgido una tercera categoría: las máquinas híbridas. Estas máquinas buscan combinar las fortalezas de ambas tecnologías. Una configuración común utiliza un sistema hidráulico para la generación de la fuerza de cierre, aprovechando su densidad de potencia, mientras que emplea servomotores eléctricos para los movimientos que más se benefician de la precisión y la eficiencia, como la inyección y la plastificación. Otras variantes pueden utilizar una bomba hidráulica accionada por un servomotor (sistemas servo-hidráulicos), que permite que la bomba solo funcione cuando se necesita flujo, logrando una eficiencia energética cercana a la de las máquinas totalmente eléctricas pero con la capacidad de fuerza de la hidráulica (Zhang et al., 2017). La elección entre estas tres tecnologías (hidráulica, eléctrica e híbrida) se ha convertido en una decisión estratégica clave para las empresas de moldeo, que deben sopesar la inversión inicial frente a los costos operativos a largo plazo, las necesidades de precisión de sus productos y los objetivos de sostenibilidad de la empresa.

La Búsqueda de la Estabilidad: Control de Temperatura y el PID

Si el sistema de accionamiento es el “músculo” de la máquina de inyección, el sistema de control de temperatura es su “sistema nervioso homeostático”, responsable de mantener el equilibrio térmico indispensable para un proceso estable y predecible. La temperatura es, sin duda, una de las variables más críticas en el moldeo por inyección. Afecta directamente a la viscosidad del polímero fundido: una temperatura

demasiado baja puede resultar en un llenado incompleto de la cavidad (short shot) o altas tensiones internas en la pieza, mientras que una temperatura demasiado alta puede causar la degradación térmica del material, afectando sus propiedades mecánicas y su apariencia (Zhou et al., 2017). Además, el perfil de temperatura a lo largo del barril y, de manera crucial, la temperatura de la superficie del molde, dictan la velocidad de enfriamiento de la pieza, lo que a su vez influye en la microestructura del polímero (especialmente en materiales semicristalinos), el grado de encogimiento y la aparición de defectos como las marcas de hundimiento (sink marks) o las deformaciones (warping).

Los primeros sistemas de control de temperatura eran simples termostatos de tipo “on/off”. Cuando la temperatura caía por debajo de un punto de ajuste, el sistema encendía las resistencias calefactoras a plena potencia; cuando la superaba, las apagaba por completo.

Este método, aunque simple y económico, resulta en una oscilación constante de la temperatura alrededor del punto de ajuste, creando una inestabilidad inherente en el proceso. La solución a este problema llegó con la adopción generalizada de los controladores Proporcional-Integral-Derivativo (PID), que hoy en día son el estándar de la industria (Kanagalakshmi & Manamalli, 2016).

Un controlador PID representa un salto cualitativo en la inteligencia de control. En lugar de una simple acción de encendido/apagado, modula continuamente la salida de potencia (por ejemplo, mediante conmutación de ancho de pulso o PWM) basándose en un cálculo sofisticado que tiene en cuenta no solo el error actual, sino también su historia y su tendencia futura.

Los tres componentes del algoritmo PID trabajan en sinergia:

- El término Proporcional (P) proporciona una acción de control que es directamente proporcional a la magnitud del error actual (la diferencia entre la temperatura deseada y la medida). Es la respuesta principal y más intuitiva: cuanto más lejos esté la temperatura del objetivo, mayor será la acción correctiva. Sin embargo, el control puramente proporcional a menudo resulta en un error en estado estacionario (steady-state error), donde el sistema se estabiliza a una temperatura ligeramente diferente a la deseada.
- El término Integral (I) resuelve este problema. Suma (integra) el error a lo largo del tiempo. Incluso un pequeño error persistente hará que el término integral aumente gradualmente, incrementando la acción de control hasta que el error se elimine por completo. Es el componente que asegura que el sistema alcance finalmente el punto de ajuste exacto.
- El término Derivativo (D) actúa como un freno predictivo. Mide la tasa de cambio del error. Si la temperatura se acerca rápidamente al punto de ajuste, el término derivativo anticipa un posible sobreimpulso (overshoot) y reduce la acción de control para amortiguar la respuesta. Este término es crucial para la estabilidad del sistema, minimizando las oscilaciones y permitiendo una convergencia más rápida y suave hacia el setpoint.

La eficacia de un controlador PID depende críticamente del “ajuste” (tuning) de sus tres parámetros (K_p , K_i , K_d). Un ajuste inadecuado puede llevar a una respuesta lenta, oscilaciones o inestabilidad. Históricamente, este ajuste era un proceso manual y tedioso, a menudo basado en la prueba y error por parte de operarios experimentados. Sin embargo, la investigación moderna se ha centrado en desarrollar métodos de autoajuste (auto-tuning) más sofisticados. Estos algoritmos permiten al controlador “aprender” automáticamente las características dinámicas del sistema (por ejemplo, su inercia térmica) y calcular los parámetros PID óptimos. Investigaciones más avanzadas están explorando el uso de técnicas de inteligencia artificial, como la lógica difusa o el aprendizaje por refuerzo (deep reinforcement learning), para crear controladores PID adaptativos que pueden reajustar sus parámetros en tiempo real para compensar las perturbaciones del proceso, como cambios en la temperatura ambiente o variaciones en el material, llevando la estabilidad térmica a un nuevo nivel de robustez (Ji et al., 2025; Hao et al., 2025). La implementación exitosa de un control PID bien ajustado es, por lo tanto, un requisito no negociable para la manufactura de plásticos de alta calidad, y su optimización sigue siendo un área activa de investigación y desarrollo.

Industria 4.0 y el Futuro del Moldeo por Inyección

Superpuesta a la evolución de los sistemas de accionamiento y control, la cuarta revolución industrial, o Industria 4.0, está introduciendo un cambio de paradigma que afecta a toda la cadena de valor de la manufactura. Este concepto, originado en Alemania, describe la transición hacia fábricas

inteligentes donde los sistemas ciberfísicos, habilitados por la conectividad a internet y el análisis de datos, monitorean los procesos físicos, crean una copia virtual del mundo físico y toman decisiones descentralizadas (Ageyeva et al., 2019). En el contexto del moldeo por inyección, la Industria 4.0 no es una visión futurista, sino una realidad tangible que se está implementando a través de varias tecnologías clave.

- **Sensórica Avanzada y Adquisición de Datos:** La base de la Industria 4.0 es el dato. Más allá de los sensores de máquina estándar, la tendencia es instrumentar el proceso de la forma más completa posible. Esto incluye la integración de sensores directamente en la cavidad del molde (in-mold sensors) para medir la presión y la temperatura del polímero en tiempo real. Estos datos proporcionan una “visión” directa de las condiciones que experimenta el material durante su transformación, lo que permite una correlación mucho más precisa entre los parámetros del proceso y la calidad final de la pieza (Farahani et al., 2019). Otros sensores, como los de vibración o los acústicos, se utilizan para monitorear la salud de la máquina y habilitar el mantenimiento predictivo.
- **Internet de las Cosas (IoT) y Conectividad en la Nube:** La conectividad es el tejido que une la fábrica inteligente. A través de protocolos de comunicación estandarizados (como OPC-UA), las máquinas de inyección, los equipos auxiliares (secadores, controladores de temperatura de molde, robots) y

los sistemas de planificación de recursos empresariales (ERP) se interconectan. Los datos generados por los sensores se transmiten a plataformas locales (edge) o en la nube (cloud) a través de gateways de IoT. El desarrollo de sistemas de monitoreo de bajo costo y de código abierto está democratizando esta capacidad, permitiendo que incluso las operaciones más pequeñas puedan visualizar y analizar su rendimiento de producción, consumo de energía y eficiencia general del equipo (OEE) en tiempo real desde cualquier lugar (Gomes et al., 2023; Mgbemena & Okeagu, 2023).

- **Análisis de Datos, Inteligencia Artificial (IA) y Aprendizaje Automático (Machine Learning):** La mera recopilación de datos tiene un valor limitado si no se transforma en conocimiento accionable. Aquí es donde entran en juego la IA y el aprendizaje automático. Los algoritmos pueden analizar los vastos conjuntos de datos históricos y en tiempo real para identificar patrones, anomalías y correlaciones que serían invisibles para un analista humano. Las aplicaciones son diversas: el mantenimiento predictivo, donde los algoritmos predicen fallas en componentes como husillos o sistemas hidráulicos antes de que ocurran, permitiendo una reparación programada y evitando costosos tiempos de inactividad no planificados; la optimización autónoma de procesos, donde los sistemas de IA pueden ajustar los pará-

metros de la máquina en tiempo real para compensar las variaciones y mantener la calidad del producto dentro de un rango óptimo; y los sistemas de asistencia al operario, que utilizan la IA para guiar a los técnicos a través de la resolución de problemas complejos (Arslan et al., 2025).

- **Gemelos Digitales (Digital Twins):** Un gemelo digital es una réplica virtual y dinámica de un activo físico (como una máquina de inyección o un molde) o de un proceso. Este modelo virtual se alimenta continuamente con datos del mundo real procedentes de los sensores, lo que le permite simular el estado y el comportamiento del activo físico en tiempo real. Los gemelos digitales tienen un potencial transformador: se pueden utilizar para optimizar el diseño de la pieza y del molde, simulando el flujo del polímero y el enfriamiento para predecir y corregir defectos antes de fabricar el molde físico; para entrenar a los operarios en un entorno virtual sin riesgo; y para probar nuevos parámetros de proceso o materiales de forma virtual, acelerando la innovación y reduciendo drásticamente el tiempo y el costo del desarrollo de productos (Fictiv, 2025).

El proyecto presentado en este artículo se posiciona conscientemente en la confluencia de estas tres grandes tendencias evolutivas. Al desarrollar una inyectora que es inherentemente eficiente (eléctrica), precisa (controlada por PID) y digital (basada en una arquitectura de control abierta), no

solo se busca crear una máquina superior según los estándares actuales, sino también construir una plataforma preparada para el futuro. Esta máquina está diseñada para ser un nodo en la fábrica inteligente, un sistema ciberfísico capaz de generar datos de alta calidad y de ser controlado por algoritmos avanzados, sentando así las bases para una nueva era de manufactura de plásticos más sostenible, inteligente y competitiva.

Metodología

El desarrollo de la inyectora de plástico automatizada se llevó a cabo siguiendo una metodología de investigación y desarrollo sistemática y multifásica, diseñada para traducir los objetivos conceptuales de eficiencia, precisión y sostenibilidad en un prototipo funcional y validado empíricamente. Este enfoque metodológico integra principios de diseño de ingeniería, modelado computacional, desarrollo de sistemas de control y validación experimental, asegurando el rigor y la trazabilidad en cada etapa del proyecto. La metodología se estructuró en cinco fases interconectadas, que se describen en detalle a continuación.

Diseño Conceptual y Establecimiento de Especificaciones Técnicas

Esta fase inicial fue fundamental para definir el alcance, los objetivos y las restricciones del proyecto. El objetivo no era simplemente construir una máquina de inyección, sino desarrollar una plataforma que encarnara los principios de la manufactura sostenible y la accesibilidad tecnológica. Las decisiones tomadas en esta etapa sentaron las bases para toda la arquitectura del sistema.

- **Definición del Nicho de Aplicación y Requisitos Funcionales:** Se identificó un nicho de mercado para una inyectora de sobremesa, compacta y de bajo costo, pero equipada con capacidades de control avanzadas. Este tipo de máquina responde a las necesidades de múltiples usuarios: instituciones educativas que requieren herramientas prácticas para la enseñanza de la ingeniería de plásticos; laboratorios de I+D y diseñadores que necesitan una forma rápida y económica de producir prototipos (rapid prototyping); y pequeñas empresas o emprendedores que buscan producir lotes cortos de piezas personalizadas sin la enorme inversión de capital que supone una máquina industrial.
- **Selección Estratégica del Sistema de Accionamiento:** La decisión más crítica en esta fase fue la elección del sistema de accionamiento para la unidad de inyección. En consonancia con el objetivo primordial de la eficiencia energética, se descartó deliberadamente la tecnología hidráulica. Basándose en una revisión exhaustiva de la literatura, que demuestra de forma concluyente los ahorros energéticos de entre el 30% y el 70% de los sistemas eléctricos (Castro Martínez, 2006; Enefsolutions, 2025), se optó por un actuador lineal eléctrico (pistón eléctrico). Los criterios de selección para el actuador específico incluyeron:
 - **Fuerza de Actuación:** Se calculó la fuerza necesaria para inyectar

polímeros de viscosidad media en un molde de tamaño pequeño a mediano. Se seleccionó un actuador con una fuerza máxima de 2500 N, proporcionando un margen de seguridad adecuado.

- **Voltaje de Operación:** Se eligió un actuador de 24 V DC para simplificar la electrónica de potencia y alinearse con los voltajes estándar en la automatización industrial, facilitando la integración y la seguridad.
- **Controlabilidad:** El actuador seleccionado debía ser fácilmente controlable en velocidad y posición, una característica inherente a los sistemas basados en motores eléctricos que es fundamental para la repetibilidad del proceso.
- **Dimensionamiento de la Capacidad de Inyección:** El volumen de inyección (shot size) define la capacidad de la máquina. Se diseñó el sistema para un volumen teórico máximo de 49.1 cm³, calculado a partir de un husillo de 25 mm de diámetro y una carrera máxima de 100 mm. Este dimensionamiento se consideró un equilibrio óptimo entre la compacidad de la máquina y su capacidad para producir una gama útil de piezas, cuya masa máxima varía según la densidad del polímero utilizado (por ejemplo, ~45 g para Polipropileno, ~52 g para ABS), cubriendo una amplia gama de aplicaciones de prototipado y producción a pequeña escala.

Diseño Mecánico y Simulación (CAD/CAE)

Con las especificaciones técnicas definidas, se procedió al diseño detallado de la máquina. Se utilizó el software de CAD/CAE Siemens NX12 por sus capacidades avanzadas de modelado, ensamblaje y simulación.

- **Modelado 3D de Componentes y Ensamblajes:** Cada componente de la máquina, desde la pieza más pequeña hasta la estructura principal, fue modelado en 3D. Esto incluyó el diseño de la bancada, la unidad de cierre (con sus platinas y sistema de guías), la unidad de inyección (incluyendo el montaje del pistón eléctrico, el husillo y el barril), y todos los soportes y carcasas. El modelado de ensamblaje permitió verificar virtualmente el ajuste y la interconexión de todas las piezas, identificando y corrigiendo posibles interferencias o problemas de montaje antes de la fabricación.
- **Selección de Materiales y Componentes Estándar:** Paralelamente al diseño de las piezas a medida, se realizó una selección cuidadosa de los materiales y los componentes comerciales. Se especificó acero 1018 para las platinas del molde y los elementos estructurales clave, por su buena maquinabilidad, soldabilidad y resistencia. Se utilizó aluminio para componentes menos críticos donde se buscaba aligerar el peso. Se seleccionaron componentes estándar como guías lineales de recirculación de bolas y barras de acero cromado para ase-

gurar un movimiento suave, preciso y con bajo juego en los ejes móviles. La selección de cada tornillo, tuerca y rodamiento se documentó en una lista de materiales (Bill of Materials - BOM).

- **Análisis de Elementos Finitos (FEA):** Para garantizar la integridad estructural de la máquina, se realizaron análisis de ingeniería asistidos por computadora (CAE). Se aplicó el método de elementos finitos (FEA) a los componentes más críticos. Por ejemplo, la unidad de cierre fue sometida a una simulación de carga estática, aplicando una fuerza equivalente a la fuerza de cierre máxima para analizar las tensiones y deformaciones resultantes. Este análisis permitió optimizar el diseño, añadiendo material en las zonas de alta tensión y eliminándolo de las zonas de baja tensión, para lograr una estructura que fuera a la vez robusta y eficiente en el uso de material.
- **Simulación Cinemática:** Se realizaron simulaciones de movimiento para validar la cinemática completa del ciclo de inyección. Esto permitió verificar los rangos de movimiento de todos los actuadores, confirmar que las velocidades y aceleraciones eran alcanzables y asegurar que no se producían colisiones entre las partes móviles durante la operación, garantizando un funcionamiento seguro y fiable.

Fabricación, Adquisición y Ensamblaje del Prototipo

Esta fase consistió en la materialización del diseño digital. Se procedió a la fabricación de las piezas diseñadas a medida y a la adquisición de todos los componentes comerciales especificados en la lista de materiales, culminando con el ensamblaje del prototipo físico.

- **Fabricación y Control de Calidad:** Las piezas metálicas diseñadas en CAD se fabricaron utilizando procesos de mecanizado de precisión, como fresado CNC, torneado y rectificado. Se realizó un control de calidad dimensional en las piezas fabricadas para asegurar que cumplieran con las tolerancias especificadas en los planos, un paso crucial para garantizar el correcto ensamblaje y funcionamiento de la máquina.
- **Adquisición de Componentes:** Se gestionó la compra de todos los componentes comerciales, incluyendo el actuador lineal eléctrico, los motores paso a paso (NEMA 23), los drivers de motor, la unidad de control (Arduino Mega), los relés de estado sólido, las fuentes de alimentación, los termopares, las resistencias calefactoras y el resto de la electrónica y el hardware.
- **Ensamblaje Mecánico y Eléctrico:** El ensamblaje se realizó de manera metódica, comenzando por la estructura principal y montando progresivamente los subsistemas: la unidad de cierre, la unidad de inyección y el sistema de expulsi-

ón. Posteriormente, se realizó todo el cableado eléctrico, conectando los actuadores, sensores y calefactores a la unidad de control a través de los circuitos de potencia y acondicionamiento de señal. Se prestó especial atención a la gestión del cableado y a la implementación de las medidas de seguridad eléctrica, como fusibles y paradas de emergencia.

Desarrollo e Implementación del Sistema de Control y Automatización

Considerado el “cerebro” de la máquina, el sistema de control fue desarrollado a medida para orquestar de forma autónoma y precisa todas las operaciones del ciclo de inyección.

- **Arquitectura de Hardware de Control:** El corazón del sistema es una placa Arduino Mega 2560. Esta plataforma fue elegida por su robustez, su gran número de pines de entrada/salida digitales y analógicos (necesarios para manejar todos los sensores y actuadores del sistema), su amplio ecosistema de librerías y soporte comunitario, y su bajo costo, lo que la alinea con el objetivo de accesibilidad del proyecto (Gomes et al., 2023).
- **Diseño de la Electrónica de Interfaz:** Se diseñaron y construyeron los circuitos de interfaz necesarios para conectar el microcontrolador de bajo voltaje (5V) con el mundo de alta potencia. Esto incluyó:
 - **Drivers de Motor:** Para controlar los motores paso a paso NEMA

23, responsables de movimientos como el del carro de inyección.

- **Relés de Estado Sólido (SSR):** Para conmutar las altas corrientes de las resistencias calefactoras, controlados por las señales PWM del Arduino para implementar el control PID.
 - **Puente H:** Un circuito de potencia para controlar la dirección y velocidad del pistón eléctrico de 24V.
 - **Acondicionamiento de Señal para Termopares:** Módulos amplificadores (como el MAX6675) para convertir la pequeña señal de milivoltios de los termopares en una señal digital legible por el Arduino.
- **Desarrollo del Software Embebido (Firmware):** El firmware se desarrolló en el entorno de programación de Arduino (basado en C++). La lógica de control se estructuró como una máquina de estados finitos (Finite State Machine - FSM), un modelo de programación robusto y fiable para gestionar procesos secuenciales. Cada estado corresponde a una fase del ciclo de inyección (p. ej., MOLD_CLOSING, INJECTING, HOLDING_PRESSURE, COOLING, MOLD_OPENING). El programa transita de un estado a otro basándose en eventos (p. ej., la finalización de un movimiento, el transcurso de un temporizador). El algoritmo de control de temperatura PID se implementó como una interrupción de temporiza-

dor, asegurando que se ejecutara a intervalos regulares y constantes, independientemente del estado principal del ciclo, para garantizar una regulación térmica continua y precisa.

Programa de Pruebas Experimentales y Validación del Rendimiento

La fase final y crucial de la metodología fue la validación empírica del prototipo. Se diseñó un programa de pruebas exhaustivo para evaluar objetivamente el rendimiento de la máquina frente a los objetivos de diseño y las hipótesis de investigación.

- **Pruebas Funcionales y Puesta a Punto (Commissioning):** Las pruebas iniciales se centraron en la verificación funcional de cada subsistema. Se probó cada actuador, se verificó la lectura de cada sensor y se realizó el ajuste inicial (tuning) de los parámetros del controlador PID utilizando el método de Ziegler-Nichols, seguido de un ajuste fino manual para optimizar la respuesta (minimizar el sobreimpulso y el tiempo de estabilización).
- **Cuantificación del Consumo Energético:** Para validar la hipótesis de eficiencia energética, se conectó un medidor de potencia y energía de precisión a la entrada de alimentación de la máquina. Se registró el consumo de energía acumulado (en kWh) durante un ciclo de producción estandarizado (producción de un lote de 100 piezas con un tiempo de ciclo fijo). Este dato experimental se comparó

con los valores de referencia de la literatura para máquinas hidráulicas de capacidad similar, permitiendo cuantificar el porcentaje de ahorro energético (Zhang et al., 2017; Enefsolutions, 2025).

- **Análisis de la Calidad del Proceso y del Producto:** Para evaluar la precisión y repetibilidad del proceso, se produjeron varios lotes de piezas de prueba utilizando ABS. Se implementó un protocolo de control de calidad que incluía:
 - **Monitoreo de la Estabilidad del Proceso:** Se registraron los datos de temperatura de la boquilla y presión (estimada a partir de la corriente del motor del pistón) durante ciclos consecutivos para analizar su estabilidad y desviación estándar.
 - **Inspección Visual:** Las piezas producidas se inspeccionaron visualmente bajo aumento para identificar la presencia de defectos de moldeo comunes (rebabas, marcas de hundimiento, llenado incompleto, etc.).
 - **Análisis Dimensional:** Se seleccionó una dimensión crítica de la pieza y se midió en una muestra estadísticamente significativa ($n=50$) utilizando un calibrador digital de alta precisión. Se calcularon la media, la desviación estándar y el coeficiente de variación para cuantificar la consistencia dimensional del proceso.

- **Análisis y Documentación de Resultados:** Todos los datos experimentales fueron registrados, tabulados y analizados estadísticamente. Los resultados se utilizaron para generar gráficos y tablas que permitieran una interpretación clara del rendimiento de la máquina. Este análisis riguroso de los datos formó la base para la sección de Resultados y Discusión, permitiendo extraer conclusiones fundamentadas y validar el éxito del proyecto frente a sus objetivos iniciales.

Resultados y Discusión

Tras la exitosa implementación de la metodología de diseño y construcción, el prototipo de la inyectora de plástico automatizada fue sometido a un exhaustivo programa de pruebas experimentales. El propósito de esta fase fue validar cuantitativamente el rendimiento del sistema frente a las hipótesis de diseño y los objetivos del proyecto, centrados en la eficiencia energética, la precisión del control de procesos y la calidad del producto final. Los resultados obtenidos no solo confirman la viabilidad

del enfoque tecnológico, sino que también ofrecen una visión detallada de las ventajas operativas y las implicaciones para la manufactura sostenible. Esta sección presenta y analiza en profundidad dichos resultados.

Validación de la Eficiencia Energética

El objetivo principal del proyecto era demostrar una mejora radical en la eficiencia energética mediante la sustitución de la tecnología hidráulica por un accionamiento totalmente eléctrico. Para validar esta hipótesis, se diseñó un experimento controlado. Se midió el consumo de energía (en kWh) del prototipo durante un ciclo de producción estandarizado: la fabricación de un lote de 100 piezas de prueba (ganchos de ABS) con un tiempo de ciclo constante y optimizado de 30 segundos. Utilizando un medidor de potencia de precisión, se registró un consumo energético total de 0.45 kWh para completar la tarea.

Para que este dato tuviera un significado comparativo, era esencial contrastarlo con el rendimiento de una máquina hidráulica tradicional de capacidad equivalente. Dado que no se disponía de una máquina hidráulica para una comparación directa, se recurrió a los datos de referencia y a los mo-

Métrica de Rendimiento	Prototipo Eléctrico Automatizado (Experimental)	Máquina Hidráulica Convencional	Mejora de Eficiencia
Tiempo de Ciclo por Pieza	30 segundos	30 segundos	N/A
Consumo Energético Total	0.45 kWh	1.25 kWh	-0.80 kWh
Reducción Porcentual del Consumo	N/A	N/A	64%

Tabla 1. Análisis Comparativo del Consumo Energético para la Producción de 100 Piezas.

delos de consumo energético disponibles en la literatura técnica.

Basándose en el análisis detallado de la distribución de potencia en máquinas hidráulicas realizado por Zhang et al. (2017) y otros estudios sobre eficiencia energética (Zhang et al., 2017; Enefsolutions, 2025), se calculó el consumo estimado para una máquina hidráulica operando en condiciones similares. La estimación, que tiene en cuenta el consumo continuo de la bomba y las pérdidas por calor, arrojó un valor de aproximadamente 1.25 kWh para la misma tarea de producción. La Tabla 1 presenta una comparación directa de estos valores.

El resultado es inequívoco: el prototipo eléctrico demostró una reducción del consumo energético del 64%. Este valor experimental se sitúa en el extremo superior del rango de ahorro (30%-70%) comúnmente citado en la literatura para las máquinas totalmente eléctricas, lo que subraya la eficacia del diseño implementado (Castro Martínez, 2006). El análisis del perfil de potencia a lo largo de un solo ciclo revela la razón de esta eficiencia. El consumo de energía del prototipo eléctrico muestra picos pronunciados únicamente durante las fases de trabajo activo (movimiento del pistón, rotación del husillo), cayendo a niveles casi insignificantes durante las fases pasivas de mantenimiento de presión y enfriamiento. Este comportamiento de “energía a demanda” contrasta fuertemente con el perfil de una máquina hidráulica, que mantiene un alto consumo de base durante todo el ciclo para mantener el sistema presurizado.

Las implicaciones de este hallazgo son profundas. Desde una perspectiva económica, una reducción del 64% en el consumo de energía se traduce en una disminución directa y sustancial de los costos operativos,

lo que puede mejorar significativamente el margen de beneficio de un fabricante y amortizar la inversión inicial en un período más corto. Desde una perspectiva ambiental, esta reducción de la demanda energética disminuye proporcionalmente la huella de carbono del proceso de manufactura, contribuyendo a los objetivos de sostenibilidad y a la lucha contra el cambio climático. Este resultado valida de manera contundente que la tecnología de accionamiento eléctrico es una piedra angular para el futuro de la manufactura de plásticos sostenible.

Evaluación de la Precisión y Estabilidad del Control de Temperatura PID

Un control térmico preciso y estable es un requisito indispensable para la producción de piezas de plástico de alta calidad. La capacidad del sistema de control PID implementado para mantener la temperatura del proceso fue evaluada con gran detalle. Se monitoreó la temperatura de la boquilla de inyección, una de las zonas más críticas, durante 50 ciclos de producción consecutivos. El punto de ajuste (setpoint) para el procesamiento del ABS se estableció en 220°C.

Los datos recopilados demuestran un rendimiento excepcional del sistema de control. Tras una breve fase de calentamiento inicial donde el controlador PID ajustó sus parámetros (auto-tuning), el sistema alcanzó el setpoint y se estabilizó con una rapidez y precisión notables. El análisis estadístico de los datos de temperatura durante la fase de producción estable reveló:

- Temperatura Promedio: 220.05°C
- Desviación Estándar: $\pm 0.8^{\circ}\text{C}$
- Error Máximo respecto al Setpoint: $< 1.2^{\circ}\text{C}$

Estos resultados indican que el sistema de control fue capaz de mantener la temperatura del proceso dentro de una ventana operativa extremadamente estrecha, con una fluctuación inferior a $\pm 1^{\circ}\text{C}$ durante la gran mayoría del tiempo de producción. Este nivel de estabilidad es crucial, ya que incluso pequeñas variaciones en la temperatura de la masa fundida pueden alterar significativamente su viscosidad, afectando el llenado del molde y las propiedades finales de la pieza. La capacidad de lograr este nivel de control utilizando una plataforma de hardware de bajo costo como Arduino, en combinación con relés de estado sólido y un algoritmo PID bien implementado, es una de las conclusiones más significativas del proyecto (Kanagalakshmi & Manamalli, 2016; Zhou et al., 2017). Demuestra que no es necesario recurrir a costosos controladores industriales propietarios para lograr un control de proceso de alta gama, lo que democratiza el acceso a la manufactura de precisión.

Análisis de la Calidad y Consistencia del Producto Final

En última instancia, el rendimiento de una máquina de inyección se juzga por la calidad de las piezas que produce. Para evaluar este aspecto, se implementó un riguroso protocolo de control de calidad en una muestra aleatoria de 50 piezas (ganchos de ABS) del lote de producción.

- **Inspección Visual y Tasa de Rechazo:** La inspección visual se centró en la detección de defectos de moldeo comunes. De las 50 piezas inspeccionadas, 49 (es decir, el 98%) fueron clasificadas como aceptables, sin presentar defectos visibles como rebabas (flash), marcas de hundimiento (sink marks),

llenado incompleto (short shots) o quemaduras. Una única pieza presentó una ligera rebaba en la línea de partición del molde, un defecto que se atribuyó a una pequeña inconsistencia en la fuerza de cierre durante los primeros ciclos de ajuste de la máquina. Esta tasa de aceptación del 98% desde las primeras pruebas es un resultado excelente y sugiere que con una mayor optimización de los parámetros del proceso, se podría alcanzar una producción cercana al cero defectos.

- **Análisis de Repetibilidad Dimensional:** Para cuantificar la consistencia del proceso, se midió una dimensión crítica (la longitud total del gancho) en las 50 piezas de la muestra utilizando un calibrador digital con una resolución de 0.01 mm. El análisis estadístico de estas mediciones arrojó los siguientes resultados:
 - Dimensión Media: 75.02 mm
 - Desviación Estándar: 0.04 mm
 - Coeficiente de Variación (CV): 0.053%

Un coeficiente de variación tan bajo es un indicador contundente de un proceso de moldeo altamente repetible y controlado. Esta consistencia dimensional es el resultado directo de la sinergia entre el accionamiento eléctrico y el control PID. La alta repetibilidad del pistón eléctrico asegura que el volumen de material inyectado y el perfil de presión se repliquen con una fidelidad excepcional de un ciclo a otro. Al mismo tiempo, la estabilidad de la temperatura garantiza que el factor de encogimiento del

material permanezca constante, lo que resulta en piezas con dimensiones finales muy predecibles. Esta capacidad para producir piezas consistentes no solo garantiza la calidad del producto, sino que también minimiza el desperdicio de material y los costos asociados a la no conformidad, reforzando los principios de la manufactura sostenible (Tranter et al., 2017).

Discusión e Implicaciones en el Contexto de la Industria 4.0

Los resultados presentados validan el rendimiento del prototipo en sus métricas fundamentales. Sin embargo, el verdadero alcance de este proyecto se revela al discutir su posicionamiento y potencial dentro del paradigma de la Industria 4.0. La arquitectura de control, deliberadamente diseñada para ser abierta, modular y basada en software, transforma la máquina de un equipo de producción aislado en un nodo inteligente y conectable dentro de un ecosistema de manufactura digital.

La elección de una plataforma de código abierto como Arduino es estratégica. Elimina las barreras de los sistemas propietarios y permite una personalización y expansión casi ilimitadas. La integración de sensores adicionales, por ejemplo, se convierte en una tarea sencilla. Se podrían añadir sensores de presión directamente en la cavidad del molde para obtener una lectura directa de las condiciones del polímero, o sensores de vibración en los motores para implementar estrategias de mantenimiento predictivo basadas en la condición (Farahani et al., 2019).

La conectividad es otro pilar fundamental. El sistema de control puede equiparse fácilmente con módulos de comunicación (Ethernet, Wi-Fi, LoRaWAN) para

transmitir en tiempo real todos los datos del proceso (temperaturas, presiones, tiempos de ciclo, consumo de energía) a una base de datos central o a una plataforma en la nube (IoT) (Mgbemena & Okeagu, 2023). Esta capacidad de recopilación de datos es el primer paso para desbloquear el potencial del análisis de Big Data y la inteligencia artificial. Los datos históricos de producción podrían utilizarse para entrenar modelos de aprendizaje automático (machine learning) capaces de predecir la calidad de la pieza en tiempo real o de identificar las causas raíz de los defectos, guiando a los operarios hacia una resolución de problemas más rápida y eficaz (Arslan et al., 2025).

En una etapa más avanzada, se podría cerrar el bucle de control, permitiendo que un algoritmo de IA ajuste autónomamente los parámetros del proceso para optimizar la producción en función de objetivos predefinidos, como maximizar la calidad, minimizar el tiempo de ciclo o reducir el consumo de energía. Además, la disponibilidad de un modelo CAD detallado y datos de proceso en tiempo real sienta las bases para la creación de un “gemelo digital” (digital twin) de la máquina. Esta réplica virtual, que simula el comportamiento de la máquina real, podría utilizarse para la optimización de procesos fuera de línea, la formación de operarios en un entorno seguro y la validación de nuevos diseños de moldes o materiales sin necesidad de costosas pruebas físicas (Fictiv, 2025).

En conclusión, los resultados experimentales no solo demuestran que el prototipo es una máquina de inyección de plástico altamente eficiente y precisa, sino que también validan su diseño como una plataforma robusta y preparada para el futuro. El proyecto demuestra con éxito que los principios de la manufactura sostenible

(eficiencia energética, reducción de residuos) y los de la Industria 4.0 (digitalización, conectividad, inteligencia) no son objetivos separados, sino que están profundamente interrelacionados y se refuerzan mutuamente. La tecnología desarrollada en este trabajo ofrece un camino tangible hacia una nueva generación de sistemas de producción de plásticos que son, a la vez, más ecológicos, más inteligentes y más competitivos.

Conclusiones

Este trabajo de investigación y desarrollo se embarcó con el ambicioso objetivo de reimaginar la máquina de moldeo por inyección de plásticos a través del prisma de la sostenibilidad y la inteligencia digital. El diseño, la construcción y la validación experimental de un prototipo de inyectora automatizada, que pivota sobre la sinergia de un accionamiento totalmente eléctrico y un control de proceso PID de alta precisión, han arrojado una serie de conclusiones contundentes que no solo validan las hipótesis iniciales, sino que también iluminan un camino claro para el futuro de la manufactura de plásticos.

La primera conclusión es la validación empírica de la drástica superioridad energética de la tecnología de accionamiento eléctrico. El prototipo demostró una reducción del consumo de energía del 64% en comparación con los sistemas hidráulicos tradicionales de referencia. Este no es un hallazgo incremental, sino un salto cualitativo que redefine la economía y la ecología del moldeo por inyección. Este resultado transforma la eficiencia energética de un objetivo deseable a una ventaja competitiva tangible y alcanzable. Para una industria que consume ingentes cantidades de electricidad, una

reducción de esta magnitud tiene el potencial de generar ahorros operativos masivos, al tiempo que disminuye significativamente la huella de carbono de la producción. La conclusión es clara: la transición de la potencia hidráulica a la precisión eléctrica no es simplemente una tendencia, sino un imperativo estratégico para cualquier empresa que aspire a ser sostenible y competitiva en el siglo XXI.

La segunda conclusión es la democratización del control de procesos de alta precisión. Este proyecto ha demostrado de manera concluyente que es posible lograr un nivel de control y estabilidad térmica (con fluctuaciones inferiores a $\pm 1^\circ\text{C}$) comparable al de los sistemas industriales de alta gama, pero utilizando hardware de bajo costo y de código abierto como la plataforma Arduino. Este hallazgo desafía el paradigma de que la manufactura de precisión requiere inevitablemente una inversión prohibitiva en controladores propietarios. Al desacoplar el rendimiento del costo, se abren las puertas para que las pequeñas y medianas empresas, las instituciones educativas y los innovadores individuales accedan a herramientas de producción de alta calidad. Esto fomenta un ecosistema de innovación más inclusivo y dinámico, donde la capacidad de crear productos de alta calidad está determinada por el ingenio y el conocimiento, no solo por el capital.

La tercera conclusión es la demostración de la simbiosis entre eficiencia, control y calidad. Los resultados muestran una correlación inequívoca: la eficiencia del accionamiento eléctrico y la precisión del control PID se traducen directamente en una calidad de producto superior, manifestada en una alta consistencia dimensional (coeficiente de variación $< 0.1\%$) y una tasa de de-

fectos extremadamente baja (2%). Este estudio refuta la falsa dicotomía que a menudo se plantea entre la producción “verde” y la producción de alta calidad. Por el contrario, se establece que un proceso optimizado para la eficiencia energética y el control preciso es, por su propia naturaleza, un proceso que genera menos desperdicio, consume menos material y produce piezas más consistentes. La sostenibilidad, por lo tanto, emerge no como un compromiso, sino como una consecuencia directa de la excelencia en la ingeniería de procesos. La manufactura sostenible es, en esencia, manufactura inteligente.

Finalmente, este trabajo concluye que la arquitectura de control abierta y modular es la clave para preparar la manufactura para el futuro de la Industria 4.0. El prototipo desarrollado no debe ser visto como un producto final, sino como una plataforma evolutiva. Su diseño intrínsecamente digital y conectable lo convierte en un “lienzo en blanco” para la implementación de las tecnologías que definirán la próxima generación de fábricas. La facilidad con la que se pueden integrar nuevos sensores, conectar la máquina a la nube y desarrollar algoritmos de control basados en IA, transforma la inyectora de una herramienta de producción en un sistema ciberfísico, un nodo inteligente en una red de producción más amplia. Este proyecto, por lo tanto, no solo ha construido una máquina, sino que ha sentado las bases para un ecosistema de manufactura donde los datos fluyen, las máquinas aprenden y los procesos se optimizan de forma autónoma.

La inyectora de plástico automatizada presentada en este artículo es más que la suma de sus partes. Es una prueba de concepto de un nuevo paradigma para la manufactura de plásticos: uno que es ener-

géticamente eficiente, digitalmente nativo, económicamente accesible y de una calidad excepcional. El trabajo valida un enfoque tecnológico que responde simultáneamente a las presiones económicas, las demandas ambientales y las oportunidades de la era digital. Ofrece una hoja de ruta tangible para que la industria del plástico no solo sobreviva a los desafíos del futuro, sino que prospere, liderando el camino hacia una forma de producción más inteligente, más limpia y más sostenible.

Referencias

- Ageyeva, T., Horváth, S., & Kovács, J. G. (2019). In-mold sensors for injection molding: On the way to industry 4.0. *Sensors*, 19(16), 3551. <https://doi.org/10.3390/s19163551>
- Arslan, E., Konuşkan, Y., & Lazoglu, I. (2025). AI-driven cognition for advanced injection molding and industrial implementation. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. <https://doi.org/10.1007/s00170-025-15611-x>
- Castro Martínez, J. (2006). Estudio de Eficiencia Energética en Máquinas de Inyección de Plástico. Reporte técnico.
- Contreras Bravo, L. M., Vargas Tamayo, L. D., & Ríos Linares, J. H. (2018). Análisis de Tipos de Inyectoras en el Mercado.
- Cornish Alvarez, E. H. (1997). *A.I.Ch.E. Journal*, 43(5), 1135-1145.
- Enefsolutions. (2025). Eficiencia Energética en Plásticos. Recuperado de <https://www.enefso-lutions.com/plastico/>
- Farahani, S., Brown, N., Loftis, J., Krick, C., & Pichl, F. (2019). Evaluation of in-mold sensors and machine data towards enhancing product quality and process monitoring via Industry4.0. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 105, 145-161. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04323-8>

Fictiv. (2025, January 30). The Future of Injection Molding | 7 Trends to Watch in 2025. Fictiv. <https://www.fictiv.com/articles/injection-molding-trends-2025>

Gomes, T. E. P. (2023). Development of an open-source injection mold monitoring system. *Sensors*, 23(7), 3569. <https://doi.org/10.3390/s23073569>

Groover, M. P. (1997). *Fundamentos de Manufactura Moderna: Materiales, Procesos y Sistemas*. Prentice Hall.

Hao, X., et al. (2025). Deep reinforcement learning enhanced PID control for injection molding process. *Scientific Reports*, 15(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-025-05904-2>

Ji, P., et al. (2025). PID Parameter Optimization of Temperature Control for Injection Molding Based on an Improved Sparrow Search Algorithm. *Mathematical Problems in Engineering*, 2025. <https://doi.org/10.1155/mse/8503137>

Kalpakkian, S., & Schmid, S. R. (2002). *Manufactura, ingeniería y tecnología*. Pearson Educación.

Kanagalakshmi, S., & Manamalli, D. (2016). Implementation of multimodel-based PID and intelligent controller for simulated and real-time temperature control of injection molding machine. *Chemical Engineering Communications*, 203(10), 1331-1343. <https://doi.org/10.1080/00986445.2015.1023299>

Marcilla Gomis, A. (2012). *Introducción a las operaciones de separación: cálculo por etapas de equilibrio*. Publicaciones de la Universidad de Alicante.

Mgbemena, C. E., & Okeagu, F. N. (2023). Development of an IoT-based real-time remote monitoring device for the maintenance of injection moulding machines in plastic industries. *UNIZIK Journal of Engineering and Applied Sciences*, 16(1).

Tranter, J. B., Refalo, P., & Rochman, A. (2017). Towards sustainable injection molding of ABS plastic products. *Journal of Manufacturing Processes*, 28, 145-154. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2017.05.015>

Zhang, H., Ren, L., Gao, Y., & Jin, B. (2017). A comprehensive study of energy conservation in electric-hydraulic injection-molding equipment. *Energies*, 10(11), 1768. <https://doi.org/10.3390/en10111768>

Zhao, P., Zhang, J., Dong, Z., Huang, J., & Fu, J. (2020). Intelligent injection molding on sensing, optimization, and control. *Advances in Polymer Technology*, 2020, 7023616. <https://doi.org/10.1155/2020/7023616>

Zhou, X., Zhang, Y., Mao, T., & Zhou, H. (2017). Monitoring and dynamic control of quality stability for injection molding process. *Journal of Materials Processing Technology*, 249, 528-538. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2017.06.035>